



中国大型升船机研究进展*

胡亚安, 李中华, 李云, 宣国祥

(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)

摘要: 回顾了近年来中国在升船机领域所取得的研究进展。首先介绍了具有自主知识产权的新型水力式升船机在基础理论及输水阀门防空化、船厢抗倾覆等方面的最新研究成果, 该形式升船机的收敛稳定性通过原型观测得到充分验证。其次介绍了中国特有的船厢下水式升船机水动力学及运行安全关键技术、传统升船机安保措施上的创新技术。此外对大型升船机水动力学基础研究、升船机三维数值模拟技术等方面的成果做了总结。

关键词: 升船机; 研究进展; 基础理论; 关键技术

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0010-10

Research developments in the field of major ship lift in China

HU Ya-an, LI Zhong-hua, LI Yun, XUAN Guo-xiang

(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)

Abstract: This paper reviews the research developments in the field of ship lift in recent years. Firstly, the latest research achievements on basic theory of hydro-floating ship lift, cavitation-resistant measures of valve, anti-capsize measures for ship chamber are introduced, and the convergence and stability of this brand new type ship lift is verified through prototype observation. Secondly, hydrodynamics and key technology of safe operation of launching-type ship lift with Chinese characteristics are presented. The innovation technologies on security measure for traditional ship lift type are also mentioned. Besides, hydrodynamic fundamental research and three-dimensional numerical simulation technologies for large-scale ship lift are summarized.

Keywords: ship lift; research developments; fundamental research; key technology

升船机是通航建筑物中的一种主要形式, 与船闸相比具有耗水少、运行速度快、提升高度受技术条件的限制少、投资随水头增加的速度比船闸低等优点, 水头越大, 其技术经济指标越优。

我国近代升船机的研究及建设始于 20 世纪 90 年代, 至今已先后建成红水河岩滩、闽江水口、清江隔河岩、高坝洲、乌江彭水、澜沧江景洪、长江三峡等升船机, 此外还有金沙江向家坝, 乌江构皮滩、思林、沙陀、红水河龙滩, 右江百色

等多座垂直升船机正在建设和设计研究中。其中景洪升船机采用具有我国自主知识产权的水力驱动式升船机形式, 为世界首创; 三峡升船机提升高度达 113 m, 提升质量达 1.5 万 t 以上, 可通过 3 000 t 的大型船舶, 它的建成为世界升船机建设树立新的里程碑; 设计和建设中的乌江构皮滩三级垂直升船机的总提升高度为 199 m, 其中间级升船机的提升高度高达 127 m, 居世界之最。这些升船机的设计和建设, 标志着我国升船机的研究水平

收稿日期: 2016-09-16

***基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0402002); 国家自然科学基金(51479123); 交通运输部科技项目(2014329746280)

作者简介: 胡亚安(1965—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事通航水力学研究。

已跻身世界前列。

1 水力式升船机创新研究成果

水力式升船机(图1)主要由承船厢、竖井、平衡重浮筒、钢丝绳、充泄水管路及机械同步系统等组成,利用水能作为提升动力和安全保障措施,通过输水管道对竖井充泄水,驱动平衡重浮筒的升降带动承船厢升降运行;在船厢荷载发生变化时,利用平衡重浮筒淹没水深的相应变化,使船厢与平衡重浮筒之间达到新的平衡状态,可较好解决船厢漏水等极端事故状态下升船机的安全问题。

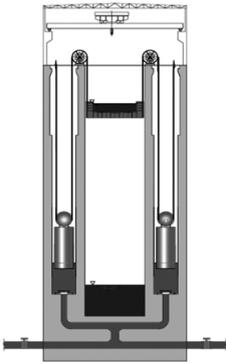


图1 水力式升船机运行原理

我国科学家针对这一新型升船机,开展了大量理论分析、物理模型试验及数值模拟仿真研究,尤其通过景洪水力式升船机现场原型观测取得丰富的研究成果。

1.1 水力式升船机设计方法和理论

提出了水力式升船机的适用范围和判断准则,平衡重、等惯性输水系统布置方法,开发了相应的运行仿真计算模型。系统研究了水力式升船机运行特性变化规律,建立运行速度与阀门开启时间及输水系统流量系数的关系式;提出该形式升船机不同阶段运行加速度的定义和控制标准^[1]。

其中,船厢运行速度 v :

$$v = \frac{dh_c}{dt} \approx \frac{2QS_p}{S_j S_p + 4(S_j - S_p)S_c} \quad (1)$$

船厢运行各阶段加速度 a :

$$a = \frac{2S_p}{S_j S_p + 4(S_j - S_p)S_c} \cdot A \sqrt{2gH} \left(\frac{d\mu}{dt} + \frac{\mu}{2H} \cdot \frac{dH}{dt} \right) \quad (2)$$

式中: Q 为输水流量(m^3/s); S_j 为竖井面积(m^2);

S_p 为平衡重面积(m^2); S_c 为船厢面积(m^2); h_c 为船厢高程(m); H 为阀门工作水头(m); μ 为输水系统流量系数; A 为输水主管面积(m^2); g 为重力加速度(m/s^2); t 为时间(s)。

1.2 水力式升船机精确对接技术及阀门开度控制准则

1) 水力式升船机精确对接技术。

传统升船机船厢运行速度相对固定,船厢运行与对接仅通过控制电机实现,控制方案及参数与水位无关。与之比较,水力式升船机船厢升降过程,竖井水位不断变化,因此船厢运行速度始终处于变化状态,且不同上下游水位条件对应的船厢速度曲线不同,需动态确定船厢对接控制方案及相关参数。鉴于此,研究提出了水力浮动升船机主辅阀门运行控制理论,有效解决了该型升船机特有的对接控制难题。

其中,根据理论推导的关门过程船厢运行距离 H_{cx} 可按式(3)^[2]计算确定:

$$\Delta H_{cx} = 2H - \left(\sqrt{H} - \frac{TS_k \mu_g \sqrt{2g}}{2k} \right)^2 / E \quad (3)$$

式中: T 为阀门关闭时间(s); S_k 为阀门面积(m^2); μ_g 为阀门综合流量系数;记 $E = 1 + \frac{4\psi S_c}{S_p}$, $k =$

$\left(S_j + \frac{4(S_j - S_p)\psi S_c}{S_p} \right) / E$;当船厢在水中时 $\psi = 1$,船

厢在空气中时 $\psi = 0$;其余符号意义同上。

2) 水力式升船机阀门开度控制准则。

①输水总时间达到设计指标;

②运行全程任何时刻卷筒制动器意外上闸产生的不平衡力应在制动器可控范围;

③阀门不发生空化、振动破坏,同时掺气量不影响竖井流态;

④控制输水系统流量增率保证船厢加速度在安全范围内;

⑤优化主、辅阀开度比,使主、辅阀流量匹配。

1.3 水力式升船机输水阀门空化问题

水力式升船机输水阀门承受水头差高达几十米,极易发生空化、振动问题。依托景洪水力式

升船机充、泄水阀门 1:10.67 常压、减压模型试验提出了充水阀门采用“阀前强迫掺气+阀后设置稳压减振体”、泄水阀门采用“阀前强迫掺气”的抗空化措施。

通过景洪升船机输水系统原型观测结果表明,采取以上抗空化措施后,大大减小了阀后压力脉动,阀门相对空化数由 1.0 降低到 0.5,使阀门的大开度开启时间提前,输水效率提高 60% 以上。妥善解决了工业阀门高水头非恒定作用下的空化、振动问题,显著提高阀门开启方式的安全性和灵活性。

1.4 水力提升系统同步难题

水力式升船机的驱动提升系统为水力式,如何提高竖井水位的同步性,使各平衡重同步升降,降低水力驱动系统对船厢不均匀荷载,是水力式升船机的关键水力学问题之一。经物理模型研究提出以下措施保障竖井水位同步性。

1) 输水系统采用“等惯性+等阻力”设计,即输水主管道进/出口至竖井的各分支管道不仅满足水流惯性长度完全相等,而且在分支管道上采用等阻力设计,在分支管路上设置阻力均衡部件,保证输水管道在狭窄垂直空间内各分支管路的流量相等,在最大程度上保证各支管进入竖井流量一致,为竖井水位同步提供第一重保障。

2) 竖井底部设置水位平衡廊道,一旦竖井之间水位不一致,可互相调节,避免竖井之间的水位差的累积,为竖井水位同步提供第二重保障。

3) 支管出口设置消能工,降低出流能量,避免水流直接冲击平衡重底部,改善平衡重底部水流条件,减小水流对平衡重的扰动;平衡重底部设置锥形体,使流线更平滑,有效减小平衡重波动。

4) 控制水力系统非恒定流对船厢运行速度稳定性的影响,控制竖井与浮筒的间隙比范围在 0.061~0.095,提高水力系统水动力特性变化及动力输出的稳定性。

1.5 水力式升船机船厢抗倾覆技术

1) 通过对景洪水力式升船机原设计方案阶段的原型观测,发现了水力式升船机船厢带水失稳现象,根据实测的同步轴间隙分布与总体刚度揭

示了船厢随机倾斜机理,探明主要影响因素,提出船厢临界失稳判别标准^[3]。

船厢运行过程中最大倾斜量 Δh 计算公式为:

$$\Delta h = \frac{\theta_2 R + \Delta h_0}{1 - \beta \delta R} + \frac{\delta R (M_b + M_p)}{2L(1 - \beta \delta R)} - \frac{4\delta M_f}{1 - \beta \delta R} \quad (4)$$

式中: θ_2 为同步轴间隙引起的同步轴转角 (rad); R 为卷筒半径 (m); Δh_0 为卷筒安装、制造误差引起的船厢倾斜量 (m); L 为船厢长度 (m); B 为船厢宽度 (m); M_b 为船厢波动引起的倾斜力矩 (kN·m); M_p 为船厢偏心荷载引起的倾斜力矩 (kN·m); M_f 为摩擦力产生的同步轴抵抗扭矩 (kN·m); 记 $\beta = \frac{LB\rho g}{24}$, $\delta = R \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{GI_{pi}}$; ρ 为水的密度 (kg/m³); g 为重力加速度 (m/s²); L_i 为第 i 个同步轴的长度 (m); G 为材料剪切模量 (GPa); I_{pi} 为同步轴截面极惯性矩 (m⁴)。

船厢稳定时,同步系统整体刚度 K 应满足以下条件:

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{GI_{pi}}} = \frac{R}{\delta} > \beta R^2 = \left(\frac{LB\rho g R^2}{24} \right) \quad (5)$$

2) 提出保障水力式升船机安全稳定运行的三大系统工作机制。即以同步稳定的水力提升系统为基础,具备主动抗倾覆能力的机械同步系统为运行保障,船厢自反馈抗倾覆导向系统为安全保障,通过三系统及其联合作用共同解决水力式升船机无自我纠偏能力的核心技术问题。

3) 通过对景洪升船机同步轴改造后船厢倾斜量、同步轴扭矩等多种物理量近千组观测实验结果的大数据分析,表明船厢多组次、不同方式、不同速度升降运行,各项技术指标和参数始终处于自恢复状态,验证了改造后的水力式升船机是一个收敛稳定的系统(图 2)。

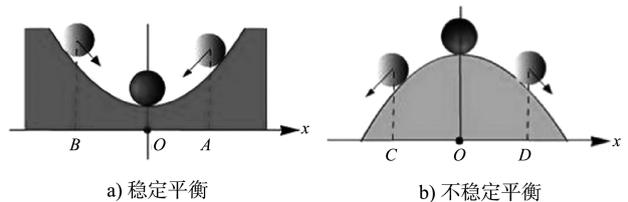


图 2 系统收敛稳定性原理

1.6 机械同步系统全相似模拟技术

升船机设计和建设中, 物理模型试验方法是研究和解决升船机运行中水力学、机电、控制等诸多问题的有效手段。模型相似条件需要综合考虑多方面相似关系, 尽可能保证物模试验成果的可靠性和准确性。在升船机机械同步系统模型的相似模拟中, 除满足提升高度、提升速度相似, 更提出应满足与原型的扭转变形一致, 以精确模拟升船机提升过程中船厢的稳定状况^[4]。

能准确反映机械同步系统达到全相似模拟的相似模拟方法, 具体可以通过改变同步轴材料和几何相似比尺, 使原型和模型的扭角比尺等于 1 的相似模拟方法来实现, 即:

$$\lambda_\theta = \frac{\theta}{\theta_m} = \frac{\lambda_T \lambda_L}{\lambda_G \lambda_I} = \frac{\lambda_L^4 \lambda_L}{\lambda_G \lambda_D^4} = \frac{\lambda_L^5}{\lambda_G \lambda_D^4} = 1 \quad (6)$$

由此可得同步轴直径几何相似比尺为:

$$\lambda_D = \frac{D}{D_m} = \frac{\lambda_L^{5/4}}{\sqrt[4]{\lambda_G}} = \frac{\lambda_L^{5/4}}{\sqrt[4]{G/G_m}} \quad (7)$$

机械同步系统同步轴模型直径换算公式为:

$$D_m = \frac{D}{\lambda_L^{5/4}} \sqrt[4]{G/G_m} \quad (8)$$

式中: λ_T 、 λ_L 、 λ_G 、 λ_I 分别为原、模型扭矩、几何、剪切模量、截面惯性矩比尺; D 、 D_m 分别为同步轴原、模型的直径(m); G 、 G_m 分别为同步轴原、模型材料的剪切模量(GPa)。

该部分的全相似模拟还可通过原型和模型的材料选择来进一步实现:

a) 若原型和模型采用相同的钢材, $G=G_m$, 则

$$D_m = \frac{D}{\lambda_L^{5/4}} \quad (9)$$

b) 若原型和模型采用不同的材料, 如原型为钢材, 模型为有机玻璃, 即 $G=79 \text{ GPa}$, $G_m=3 \text{ GPa}$, 则

$$D_m = \frac{D}{\lambda_L^{5/4}} \sqrt[4]{G/G_m} \approx 2.265 \frac{D}{\lambda_L^{5/4}} \quad (10)$$

2 下水式升船机船厢出入水问题研究

根据承船厢与下游引航道对接时, 承船厢是否浸泡入下游引航道水体中, 可分为船厢不下水

式升船机(图 3)和船厢下水式升船机(图 4)两大类。相比于传统的船厢不下水形式, 下水式升船机不仅具备适应我国中西部河流下游引航道水位变幅大、变率快的特点, 船厢对接准确可靠; 而且省去下闸首及其相应的附属设备, 包括顶紧、密封机构等, 同时运行过程的程序大大减少, 即取消了对接顶紧密封机构运行、间隙充泄水、工作闸门启闭这些环节, 从而缩短了船只过坝时间, 增加了通过能力, 提高运行效率, 比较适合我国河流水量及水位随季节变化很大的特点。

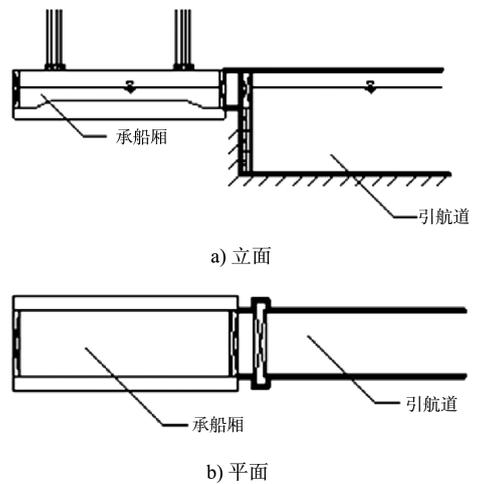


图 3 不下水式升船机布置

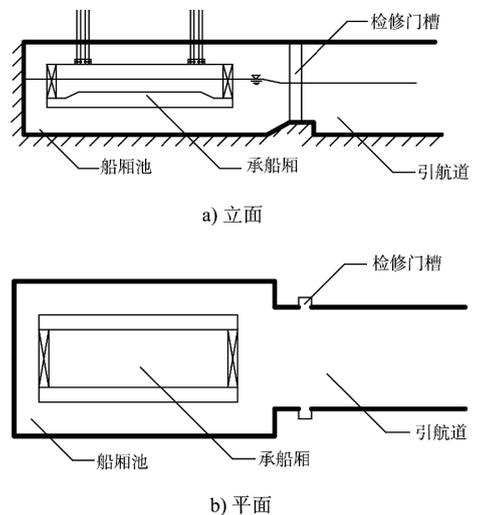


图 4 下水式升船机布置

下水式升船机在具有上述优越性的同时, 存在船厢出入水这一特殊的水力学问题(图 5、6), 由于升船机船厢与船池周围空间十分有限, 船厢出入船池将引起船池内水面壅高或降低, 船厢出

入船池的方式对船厢结构及钢丝绳受力、船厢内船舶停泊条件、船池内水面波动等影响十分复杂。

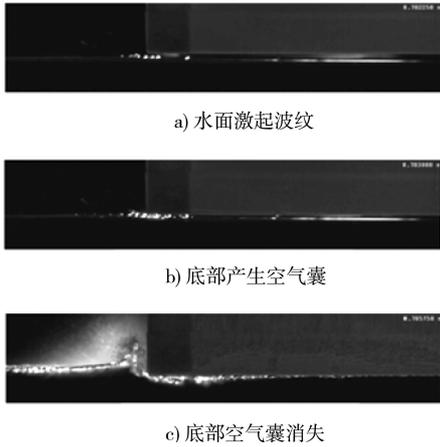


图5 船厢入水瞬时流态

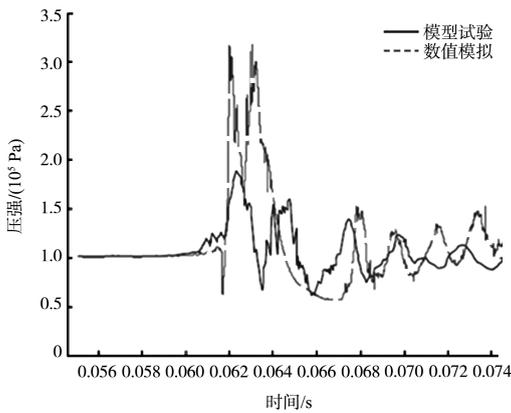


图6 船厢入水瞬时船厢底部压力变化

2.1 下水式升船机船厢体型优化

利用数值模拟计算(图7)及物理模型试验研究对下水式升船机船厢结构体型进行优化——船厢底部采用楔形体形式(图8)同时主梁开孔,两种措施相结合可有效降低船厢出入水时受到的附加水动力荷载(图9、10),保障升船机钢丝绳受力安全。

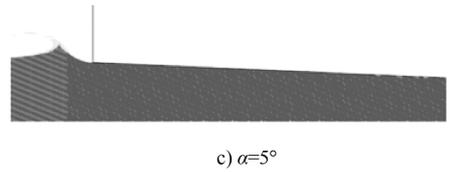
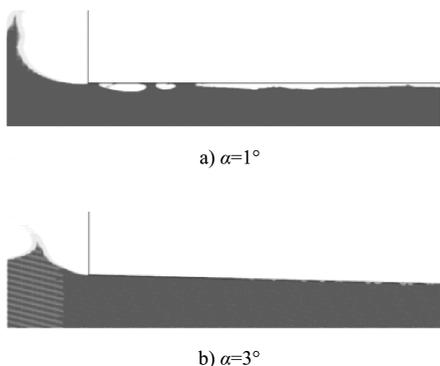


图7 不同底部形式船厢入水过程数值模拟

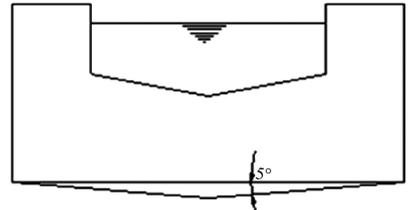


图8 船厢底部形式

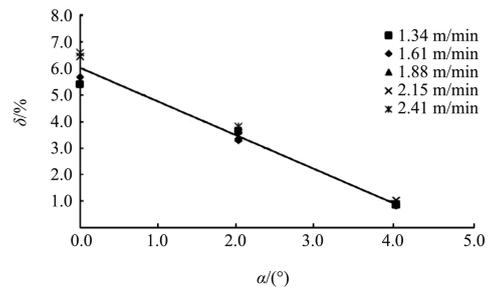


图9 附加水动力荷载与船厢底部夹角的关系

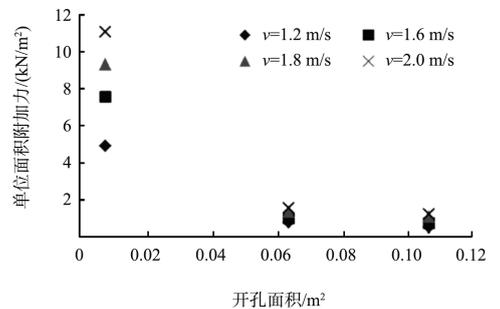


图10 附加水动力荷载与开孔面积的关系

2.2 船厢出入水附加水动力荷载计算公式

船厢出入水过程由于水面张力等因素造成的附加水动力荷载(图11),研究建立了附加水动力荷载的精确计算方法,为下水式升船机最大提升力提供理论依据。船厢出入水速度在1.0~2.2 m/min时,船厢单位面积受到的吸附力和上托力与船厢出水速度间存在以下近似关系^[5]:

$$\sigma_c = 20 \ln(1.03 v_c) \quad (11)$$

式中: σ_c 为单位面积吸附力/上托力 (kN/m^2); v_c 为船厢速度 (m/min)。

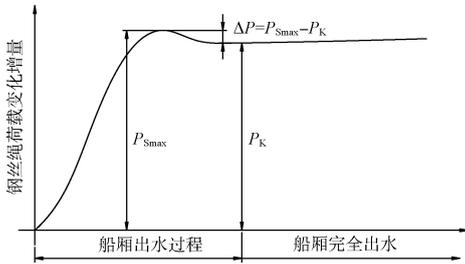


图 11 船厢出入水过程提升荷载变化曲线

2.3 船厢出入水速度控制标准、对接方式及安全保障措施

通过建立船厢出入水速度控制标准，提出了船厢出入水速度限值。船厢出水过程，钢丝绳最大总受力变化差与船厢所受的最大吸附力基本相同，船厢出水速度大于 1.2 m/min 时，可以采用船厢出水过程所受的最大吸附力作为船厢出水时所受的最大总提升力所受附加荷载。船厢入水过程中，船厢室水面壅高引起的船厢各吊点荷载变化是船厢总提升力及安全制动器制动力的主要控制条件减小该提升力最有效的方法是降低船厢入水速度，减小船厢水面壅高。从降低船厢室内水面波动、减小船厢总提升力、制动器制动力及船厢内船舶停泊条件等因素考虑，建议：船厢出水速度为 1.6~1.8 m/min (图 12)；船厢入水时，在船厢底板接触水面前将船厢速度降低至 1.0~1.2 m/min (图 13)。

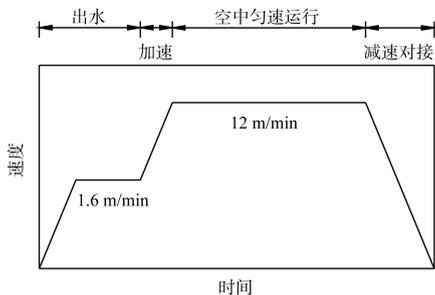


图 12 船厢出水上行速度

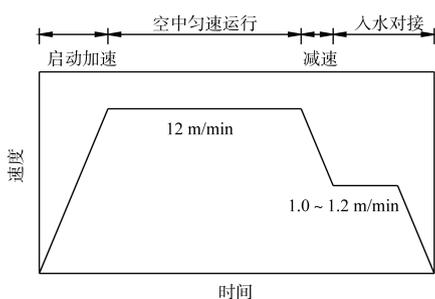


图 13 船厢下行入水速度

通过在船厢上设置导向限位装置，以减小船厢严重纵向摆动和水面波动，从而保障船厢内船舶及升船机的整体运行安全。同时，提出了制动器制动力设计参考值，解决船厢水中上升急停的安全问题。

3 传统升船机安保措施上的创新技术

3.1 钢丝绳卷扬升船机安全保障技术创新

保障升船机的运行安全是升船机建设中的首要问题。对于全平衡钢丝绳卷扬提升升船机，升船机运行过程中船厢发生超量漏水事故导致系统平衡条件被破坏是其主要安全隐患。

为解决船厢漏水引起的船厢安全问题，钢丝绳卷扬提升式升船机一般在主提升机上布置有工作制动器和安全制动器，船厢上设置了安全锁定装置，作为防止船厢漏水的安全措施。安全制动器布置在转矩卷筒上，工作制动器设在电机轴上，制动器均采用弹簧上闸、液压松闸的盘式制动器。正常停机时，工作制动器首先上闸，延时数秒后安全制动器上闸；事故时工作制动器紧急分级制动，如工作制动器紧急制动失效，安全制动器可以进行紧急制动，通过安全制动器解除转矩平衡重对船厢的作用，保障平衡系统不被破坏。

除以上基本安全保障措施之外，水口升船机专门研制了一套承船厢安全锁定装置(图 14)，利用该装置可将升降运行中发生超量漏水的承船厢及时锁定在钢梯上。其工作原理为 4 套安全锁定装置设置在主提升机械的吊具上，每套锁定装置设有两个 3 齿锁定块，船厢失水后，平衡重侧重力拉动船厢上升，3 齿锁定块即能自动锁定承船厢。锁定动作前，通过升船机集中控制系统对厢内水量的自动检测和判断，自动从正常运行程序转入承船厢超量漏水锁定运行程序，在漏水量达到主提升设备失去控制能力前，将承船厢运行到达钢梯的可锁定部位，停机并等待锁定自动投入。该安全锁定装置经现场原型失水试验证明工作原理和运行程序正确，能有效锁定超量失水的承船厢，锁定荷载达到设计要求。

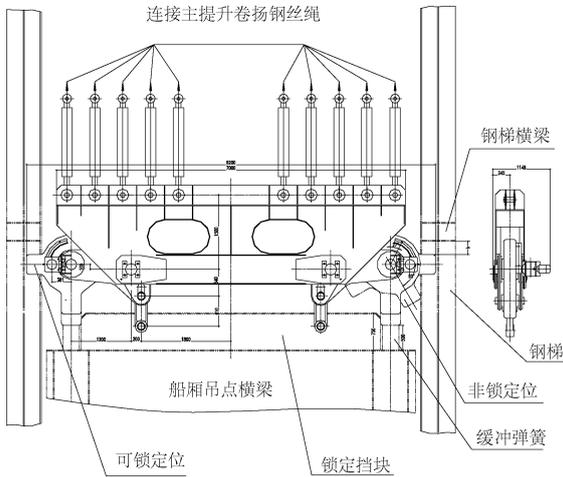
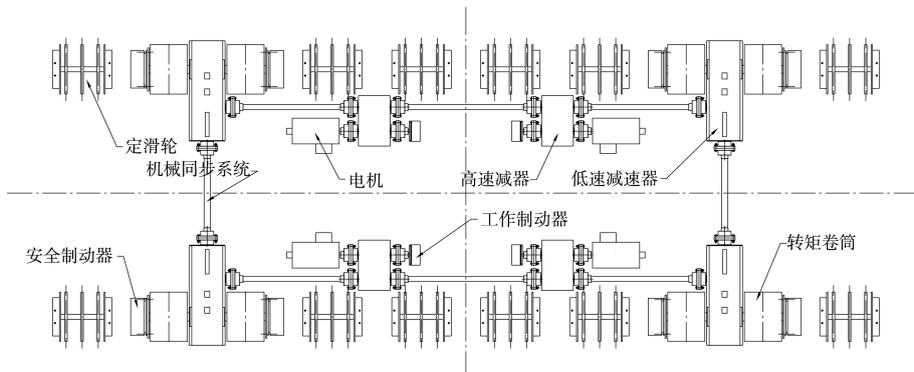


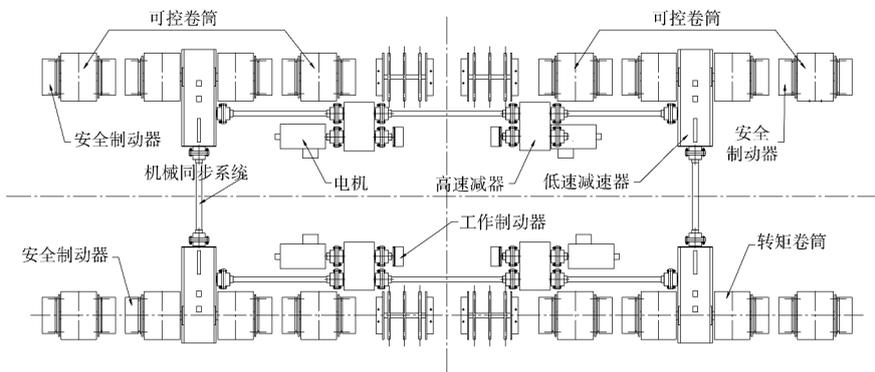
图 14 水口升船机安全锁定装置

乌江思林升船机则采用增加可控平衡重数量的方法解决船厢漏水问题^[6](图 15)。其工作原理为:

可控卷筒和转矩卷筒上布置的可控平衡重和转矩平衡重的总质量等于船厢内水体质量,并在各卷筒上布置与所挂平衡重质量相匹配的安全制动器。升船机正常运行时,可控卷筒上的安全制动器处于开启状态,可控卷筒和可控平衡重的功能与定滑轮和重力平衡重的功能相同,主要用于平衡船厢及船厢内的水体质量,减小电机的功率;船厢发生严重漏水时,可控卷筒上的安全制动器处于闭合状态,可控卷筒上的可控平衡重不再对船厢发生作用,可控卷筒和可控平衡重的功能与转矩卷筒和转矩平衡重的功能完全相同,通过制动器克服船厢内水体减少引起的船厢侧与平衡重侧的质量差,保证升船机始终处于平衡状态。



a) 传统钢丝绳卷扬升船机



b) 乌江思林钢丝绳卷扬升船机

图 15 乌江思林升船机安全保障措施

3.2 升船机船厢“临界失稳水深”判别标准

对于钢丝绳卷扬全平衡升船机,一旦船厢侧质量与平衡重质量不平衡时,船厢就会失稳。理论上,设计的转矩平衡重能够克服相同质量的船

厢漏水量。然而实际上有多种因素对船厢造成附加倾斜力矩,如船厢质量、尺寸误差造成的船厢重心偏移,吊点、卷筒等误差导致船厢产生微小倾斜,船舶进出船厢及卧倒门启闭造成的船厢水

面波动等。

通过大量模型试验研究大型钢丝绳卷扬全平衡式升船机船厢失稳水深与转矩平衡重配置比例关系, 提出船厢转矩平衡重必须大于最大设计失水质量的 1.33 倍, 改变了传统 1:1 设计理念。

4 升船机水动力学基础研究

船厢与上、下游对接过程是升船机运行全过程中的重要环节。为减小拖动系统的功率、降低工程造价和设备制造难度, 设计确定的船厢的断面系数较小, 一般仅为 2.0, 由此导致船舶进出船厢时的水力学问题十分复杂, 需要确定合理的船厢水深和船舶航行方式, 防止船舶进出船厢时发生触底和船厢荷载发生剧烈变化, 保障船舶及船厢安全。此外, 升船机船厢门启闭时, 由于船厢门挤压船厢内水体及船厢内外水位差的存在导致船厢内水面波动, 不仅影响船厢内船舶停泊安全, 还影响升船机的整体运行安全。

我国科学家依托各项工程、根据理论分析及多座升船机系列模型试验成果解决了船舶进出船厢、船厢门启闭及船厢对接等水动力学安全问题, 为升船机运行规程及行业标准制定提供了科学依据。

4.1 船舶进出船厢最大下沉量计算方法

建立了具有普遍适用性的船舶进出船厢最大下沉量计算公式, 确定合理的安全水深, 提出保证船舶及升船机安全的船舶进出厢速度及吃水控制标准, 解决船舶进出船厢的航行安全难题^[7]。

$$\frac{\delta}{H} = \sigma \cdot \frac{v^2}{2gh} \cdot \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 - 1 \right] - \tau \quad (12)$$

式中: δ 为下沉量(m); H 为门槛水深(m); v 为船舶航速(m/s); n 为断面系数, $n = F/f$; F 为闸室过水断面面积(m^2); f 为船舶中断面的水下部分面积(m^2); h 为船厢水深(m); g 为重力加速度(m/s^2); σ 、 τ 是与船型有关的经验系数。

4.2 升船机船厢设计水深及船舶航行控制标准

由于升船机承船厢断面系数较小, 船舶航行阻塞效应十分明显, 需确定合理的船舶吃水标准和航行方式, 防止船舶进出船厢时发生触底, 保障船舶及船厢安全。

理论分析及系列研究表明, 从升船机运行效率及安全性考虑, 建议承船厢正常设计水深时的船舶底部的安全富余量一般应不小于 0.5~0.6 m。相应地升船机船舶进船厢的最大航速为 0.7 m/s, 船舶出船厢的最大航速为 0.6~0.7 m/s; 在此进出船厢航速标准下, 认为 500 吨级升船机船厢最小正常设计水深为 2.5 m, 1 000 吨级升船机船厢最小正常设计水深为 3.0 m; 船舶进出船厢过程, 船厢内的最大误载水深为 -0.1 m, 极限情况不超过 -0.2 m。

4.3 船厢对接水位误差控制

船厢对接及卧倒门启闭水动力学问题涉及到两方面: 一是船厢内船舶系缆力增大; 二是船厢水面波动导致纵倾力矩变化, 影响船厢提升过程平稳性。

通过几座不同升船机物理模型试验, 提出了升船机卧倒门启闭过程系缆力 P_z 的计算公式:

当引航道水位高于船厢内水位, 即 $\Delta h \geq 0$ 时

$$P_z = 0.334 \frac{W\Delta hb}{A_k - A_m} \sqrt{\frac{gh}{t_v}} + 0.152 \frac{Wbh^2}{(A_k - A_m)t_v} + 0.8 \quad (13)$$

当引航道水位低于船厢内水位, 即 $\Delta h < 0$ 时,

$$P_z = 0.334 \frac{W\Delta hb}{A_k - A_m} \sqrt{\frac{gh}{t_v}} \quad (14)$$

式中: A_k 为船厢过水断面面积(m^2); A_m 为船舳横剖面面积(m^2); W 为船舶排水量(kg); t_v 为船厢门启闭时间(s); h 为船厢水深(m); b 为船厢宽度(m); g 为重力加速度(m/s^2)。

结合船舶允许系缆力控制标准, 500 吨级升船机船厢卧倒门开启过程, 建议船厢内外水位差最大不超过 ± 0.1 m; 船厢门关闭时间应不小于 80 s,

开启时间控制在 80~120 s 范围。

4.4 中间渠道水力学问题

中间渠道为封闭、狭长、小断面系数下的特殊限制性渠道，其航行条件及水力学技术难点包括：船舶航行安全——船舶安全行驶、会让速度和方式；升船机对接安全——船行波的控制、消波措施等。

以乌江构皮滩三级垂直升船机为代表，对国内外最复杂的中间渠道尺度、船舶航行会让方式、水面波动特性及消波措施等进行研究，解决长距离、小断面系数下中间渠道复杂水力学技术问题。

依托构皮滩升船机建立比尺为 1:16 的中间渠道物理模型试验，建立了交汇区特征长度在不同船舶航速下与航迹带宽度、航线漂移量、最小安全距离的关系，提出了最经济的交汇区布置形式，以及船舶采用曲进直出方式在中间渠道交汇区交汇。提出中间渠道交汇区的最小尺度及布置形式；建立了船舶在中间渠道狭浅封闭的水域内航行的最大下沉量及水面波动计算公式；建立了中间渠道断面系数与船舶航行速度关系，提出单向限制性渠道的最小断面系数标准及船舶的合理航行速度和会让方式^[8]。

5 升船机三维数值模拟技术

升船机数值模拟计算机仿真方面，目前主要用于承船厢、塔柱结构、电气传动系统的虚拟仿真、升船机的船水耦合、升船机整体特性动态仿真等方面的研究，随着计算机技术的发展也出现了开始采用三维可视化技术进行升船机整体运行特性研究方面的尝试。

升船机塔柱结构作为升船机的土建主体结构，一般为超大高耸薄壁的钢筋混凝土结构。升船机塔柱结构需要考虑水荷载、自重荷载、风荷载、温度荷载以及地震荷载等荷载，受力情况十分复杂，因此其结构安全问题一直是升船机研究的重点。升船机塔柱结构静力分析主要早期采用平面二维有限元法进行计算分析，目前已基本采用三维有限元法进行分析。

国内多家科研机构和高校对升船机电力驱动系统、液压调平系统、机械传动系统、船厢水体流固耦合开展了大量的数学模型仿真研究，在思林升船机机械系统研究中采用三维虚拟样机技术与物理模型试验相结合的方法，系统研究了机械提升系统受力特性，提出传统升船机同步轴设计标准和机械传动效率。

升船机承船厢水力学计算方面，升船机运行过程承船厢-水-船舶间的复杂非线性耦合系统，采用数学模型计算十分困难，国内早期主要在水动力学线性理论的框架下，考虑流体和船体运动间的耦合效应，建立承船厢在升降过程中受到加速度激励时，厢内流体和船体运动耦合方程进行求解。近年在水力式升船机的研究中，针对水力式升船机竖井水面耦合区和船厢耦合区各自特点建立三维非线性耦合模型，采用 ALE 法求解；两个不同类型界面耦合间则采用弹性理论建立结构耦合模型，采用结构区间耦合迭代求解，取得了较理想的结果。此外，在水力式升船机阀门非定常空化模拟、承船厢出入水及船厢门启闭过程水动力特性三维模拟等发面也开展了大量的数值计算研究工作，见图 16~19。

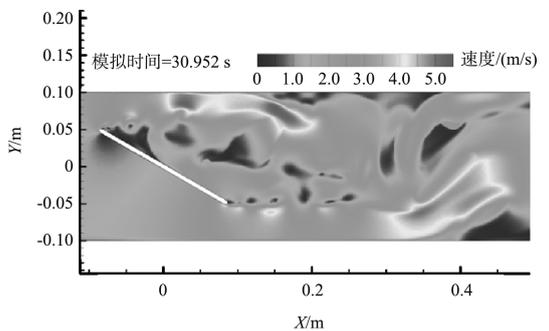


图 16 阀门非定常空化模拟

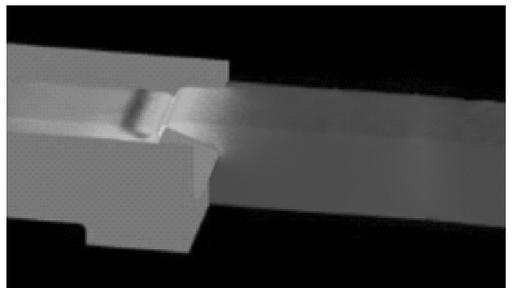


图 17 船厢卧倒门启闭三维数值模拟

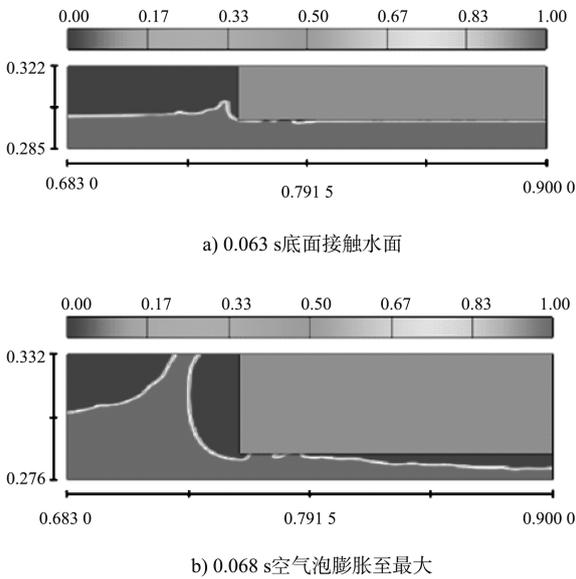


图 18 船厢出入水三维数值模拟 (单位: m)

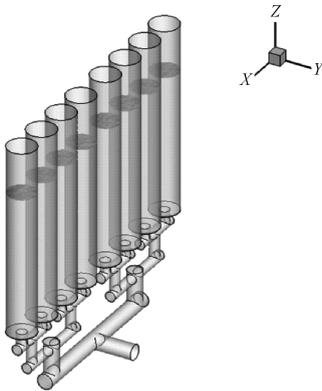


图 19 水力同步系统三维数值模拟

6 结论

综上所述, 在升船机水力学研究领域, 我国科学家取得的丰硕成果: 提出并建成了首座具有自主知识产权的水力式升船机, 现已投入运行; 在钢丝绳卷扬提升式升船机安全保障技术方面有了重大进展; 形成并完善了升船机水动力学理论, 拥有下水式升船机等多项创新技术。这些成果不仅促进了我国升船机事业的发展, 而且为世界升船机的建设和发展做出了重要贡献。

在我国内河水运快速发展的背景下, 升船机领域已取得了的许多成果, 但随着一批具有世界水平的升船机的设计和建设, 对科学研究也提出了更高要求。如在更大提升质量的升船机建设工程方面, 均面临着不少的建设难度。因此, 笔者认为可在以下三方面进行更为深入的研究和探索:

- 1) 超高升程、超大船厢升船机前沿性技术;
- 2) 涵盖水动力学、结构动力学、机械学、液压、电气、船舶流体力学等多学科的一体化升船机原型观测技术;
- 3) 升船机运行安全诊断与保障技术。

参考文献:

- [1] 胡亚安, 李中华, 宣国祥, 等. 水力式升船机应用基础研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [2] 李中华, 胡亚安, 宣国祥. 澜沧江景洪水力式升船机运行控制水力学技术咨询报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.
- [3] 胡亚安, 李中华, 郭超, 等. 景洪水力式升船机同步轴系统及极端工况模型验证试验[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014.
- [4] 陈莹颖. 钢丝绳卷扬垂直提升式升船机整体物理模型全相似模拟[J]. 水运工程, 2014(6): 30-35.
- [5] 胡亚安, 李中华, 谢俊英, 等. 构皮滩 1:10 船厢下水式升船机水动力学及运行安全研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.
- [6] 胡亚安, 李中华, 薛淑, 等. 乌江思林水电站垂直升船机 1:10 全整体物理模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [7] 胡亚安, 李中华, 李云, 等. 三峡升船机船厢及引航道水力学关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [8] 李中华, 胡亚安, 严秀俊. 构皮滩升船机第一级中间渠道水流及船舶航行条件研究[R]. 南京水利科学研究院, 2011.

(本文编辑 王璁)