



下水式升船机船厢底缘形式研究*

王敬鹏¹, 胡亚安², 李中华², 薛淑²

(1. 南水北调中线干线工程建设管理局河南分局, 河南 郑州 450003;

2. 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: 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主体底缘形式进行系统研究, 探讨不同底缘形式的船厢对出入水过程船厢池水面波动、吸附力、拍击力及附加水动力荷载的影响。研究表明: 船厢底缘角度的增大可有效降低船厢出水吸附力与入水拍击力, 同时考虑到船厢底缘角度的增大会引起船厢质量的增加, 提出船厢底缘较优角度为 4°。

关键词: 下水式升船机; 船厢出入水; 水动力特性; 船厢底缘形式

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0176-07

Study on bottom type of chamber for submerge ship chamber ship lift

WANG Jing-peng¹, HU Ya-an², LI Zhong-hua², XUE Shu²

(1. Henan Branch of the Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Zhengzhou 450003, China; 2. 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: The paper builds a physical generalized model of launching type ship lift with scale of 1:20 to study bottom type of ship chamber systematically. The effect of different bottom types on water level fluctuation in chamber tank, adsorption force, slamming force and additional hydraulic load during the ship chamber in and out of water is discussed. The result shows that increasing the angle of sphenoid type at bottom of ship chamber can decrease adsorption force and slamming force effectively. Because the increase of angle of sphenoid increases the mass of the ship chamber, the recommended angle is 4°.

Keywords: submerge ship chamber ship lift; ship chamber falling into and rising from water; hydrodynamic characteristics; bottom type of ship chamber

下水式升船机主要是为了应对下游引航道水位变幅大、变率快的特点而提出的一种新型升船机, 相比于不下水式升船机, 具有结构形式简单、运行效率高、对多泥沙河流通航有一定的便利性、安全性能大幅提高的特点^[1-2]。

根据前人研究成果, 影响船厢出入水过程水

动力学特性的因素主要有: 船厢体型、船池尺寸、出入水速度、引航道尺度等^[2-6], 为确保升船机的安全有效运行, 必须对上述因素进行优化。在前人研究中, 船厢形式的优化主要是针对船厢外部附属结构, 而对于船厢主体的底缘形式, 只是经验性地做了一个楔形体, 不同楔形体形式对船厢

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家自然科学基金(51479123); 交通运输部科技项目(2014329746280)

作者简介: 王敬鹏(1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事升船机水动力学及水工水力学研究。

出入水水动力特性的研究却未涉及。本文采用固定船池尺寸, 改变船厢底缘形式, 分别采用 0°楔形体(平底体)、2°楔形体及 4°楔形体 3 种形式出入水, 通过分析船厢底缘楔形体角度、船厢出入水速度与船厢出入水过程水动力特性之间的关系, 提出下水式升船机船厢较优底缘形式。

1 物理模型

结合本项目的研究内容, 试验要求以及试验

场地的规模, 下水式升船机物理模型试验模型比尺采用 1:20, 模拟范围包括升船机主体段与下游引航道, 主要由 5 部分组成: 提升系统、船厢、船池、引航道以及下游平水设施。

本试验不考虑船厢出入水过程船厢的弹性变形, 因此, 船厢主体采用灰塑料板制作。船厢底缘楔形体也采用灰塑料板制作。根据试验要求, 分别制作 0°楔形体(平地板)、2°楔形体及 4°楔形体 3 种形式船厢, 船厢底缘形式见图 1。

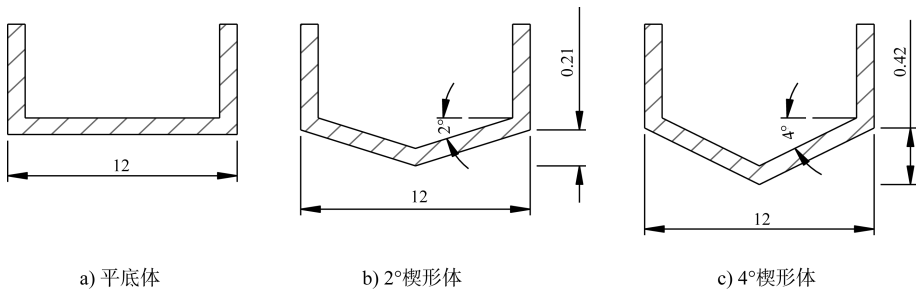


图 1 船厢底缘形式 (单位: m)

在工程应用中, 下水式升船机船厢出入水速度一般为 1.8 m/min, 为研究船厢出入水速度对船厢出入水水动力特性的影响, 试验中采用了 0.80、1.34、1.61、1.88、2.15、2.41、2.68、2.95 m/min 共 8 个速度出入船池。试验中, 同步测量船厢出入水过程中船池波动特性、钢丝绳受力特性等, 分析船厢底缘楔形体角度、船厢出入水速度以及船厢出入水过程水动力特性之间的关系。

2 不同形式船厢出水水动力特性

2.1 船池水面波动影响

表 1 统计了不同出水速度 v_u 下, 船厢出水过程中池内水面的最大降低值 ΔH_1 , 其关系见图 2、3, 从图中可以看出:

- 1) 船厢出水过程中, 船池内水面最大降低值随出水速度的增加而增加;
- 2) 船厢形式对船池内水面最大降低值影响不大, 同一出水速度下, 不同形式船池内水面最大降低值差值一般在 3 cm 左右。

表 1 船厢出水池内水面最大降落值

$v_u / (\text{m}/\text{min})$	$\Delta H_1 / \text{cm}$		
	平底体	2°楔形体	4°楔形体
0.80	-12.7	-15.8	-15.4
1.34	-23.2	-25.7	-22.0
1.61	-31.4	-31.0	-28.5
1.88	-35.7	-37.6	-36.0
2.15	-37.9	-41.9	-40.9
2.41	-46.9	-47.0	-45.7
2.68	-51.0	-53.2	-51.6
2.95	-54.8	-58.0	-58.6

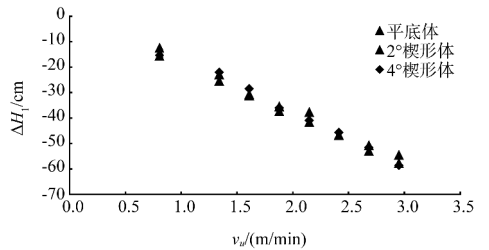


图 2 船池水面最大降低值与出水速度关系

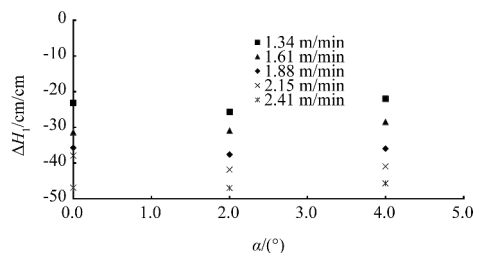


图 3 α 对船池水面最大降低值的影响

表2统计了船厢出水过程中，池内水面波动变化率最大值 k_{max} 与船厢出水速度 v_u 、楔形体角度 α 之间的关系，从图4船池水面波动最大变化率与出水速度的关系可以看出，船厢出水过程，池内水面波动变化率最大值随出水速度的增加而增加；船厢底缘楔形体的不同，对波动变化率影响不大。

表2 船池水面波动最大变化率统计

$v_u / (m/min)$	$k_{max} / (cm/s)$		
	平底体	2°楔形体	4°楔形体
0.80	-1.1	-1.1	-1.2
1.34	-2.0	-1.8	-2.1
1.61	-2.1	-2.1	-2.3
1.88	-2.7	-2.5	-2.7
2.15	-2.6	-2.8	-3.0
2.41	-3.1	-3.1	-3.2
2.68	-3.1	-3.3	-3.5
2.95	-3.9	-3.5	-4.0

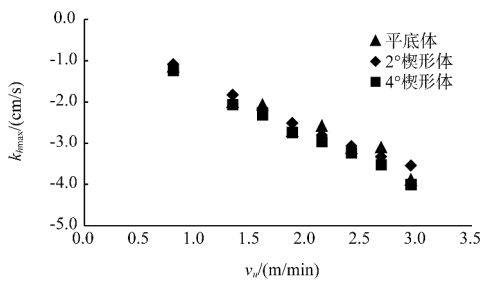


图4 船池水面波动最大变化率与出水速度关系

究其原因，船厢底缘楔形体的改变对船厢出入水水体量的改变影响较小，因此，对船池内波动特性影响较小；池内水体波动特性主要与出水速度有关，在固定船池形式的情况下，降低船池内水面最大波动值、最大波动变化率的最有效的方法是选用较低的出水速度。

2.2 船厢出水吸附力影响

定义船厢出水钢丝绳总提升力最大值为 P_{max} ，船厢完全出水后钢丝绳总提升力稳定后值为 P_0 ，则船厢出水过程所受的吸附力为 $P_c = P_{max} - P_0$ ，定义 $\delta = P_c / P_0$ ，表征不同形式船厢对降低出水吸附力的影响程度，不同出水速度下船厢吸附力见表3。图5~7分别为 v_u 与 P_c 的关系、 v_c 对 δ 的影响、 α 对 δ 的影响，可以看出：

1) 虽然从 $v_u - P_c$ 之间的关系可以看到船厢出

水吸附力随船厢入水速度的改变而有所波动，但是，从 $v_u - \delta$ 关系可以看出：平底形式船厢， δ 在不同的 v_u 下，其最大差值不超过 1%；2°楔形体底缘形式船厢下， δ 在不同的 v_u 下，其最大差值不超过 1.6%；特别是在 4°楔形体底缘形式船厢下， δ 在不同的 v_u 下，其最大差值不到 0.5%。可以看出相同船厢底缘形式，不同出水速度船厢受到的吸附力基本相同，因此船厢出水速度对船厢吸附力基本上没有影响。

2) 从 $\alpha - \delta$ 关系中可以看出，随着 α 的增大， δ 迅速减小。当船厢底缘采用平底体时， δ 一般在 6% 左右；当底缘楔形体角度达到 2° 时， δ 已降低至 3% 左右；而当底缘楔形体角度达到 4° 的时候， δ 最大只有 1%。可见船厢底缘形式采用楔形体可显著降低船厢出水吸附力。当船厢底缘楔形体角度达到 4° 的时候， δ 最大只有 1%，可以看出，船厢吸附力已对升船机运行没有影响，且 δ 与 α 基本成线性关系；另一方面，继续增大底缘楔形体角度，会带来船厢水体质量的增大，已无增大楔形体角度的必要。

表3 不同船厢形式下出水速度对应的吸附力

$v_u / (m/min)$	平底体		2°楔形体		4°楔形体	
	P_c / kN	$\delta / \%$	P_c / kN	$\delta / \%$	P_c / kN	$\delta / \%$
0.80	1 042.99	5.10	563.09	2.52	154.34	0.67
1.34	1 110.56	5.40	801.62	3.65	196.42	0.87
1.61	1 165.61	5.68	732.43	3.29	192.25	0.83
1.88	1 117.83	5.46	740.85	3.38	219.41	0.95
2.15	1 321.38	6.46	765.13	3.45	237.81	1.03
2.41	1 359.18	6.59	836.16	3.83	206.11	0.88
2.68	1 421.43	6.95	905.03	4.13	187.65	0.82
2.95	1 315.31	6.43	815.08	3.66	214.56	0.92

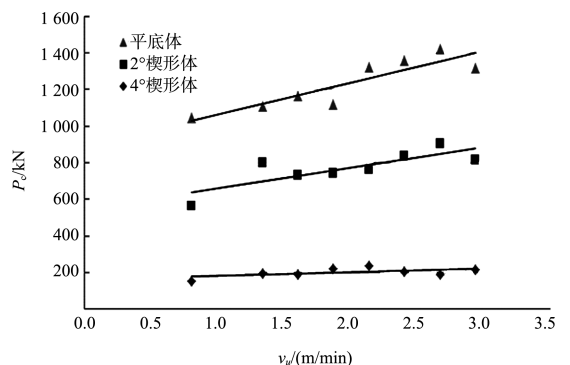


图5 v_u 与 P_c 的关系

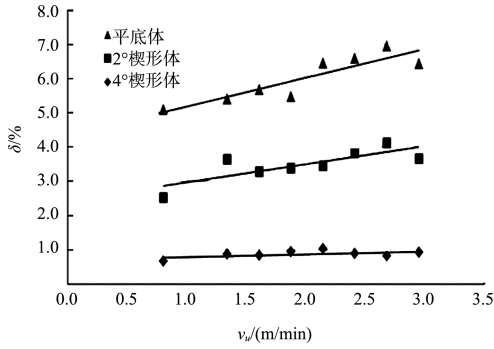


图 6 v_u 对 δ 的影响

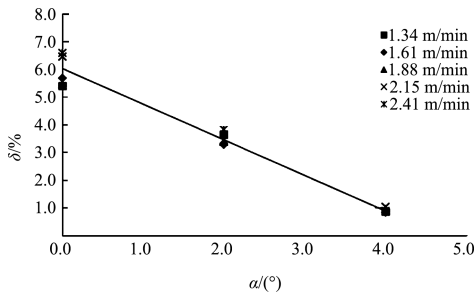


图 7 α 对 δ 的影响

2.3 船厢出水启动动力影响

定义船厢单位面积启动动力为 σ_1 ，不同形式船厢出水所受启动动力统计值见表 4。图 8、9 分别为船厢出水速度与启动力的关系、 α 对船厢启动力的影响，可以看出：1) 船厢启动力与出水速度成线性增长关系，出水速度越大，则启动力越大；2) 在船厢出水速度较低的情况下 ($v_u < 1.88$ m/min)，船厢形式对启动力的影响不明显，说明在低速出水时，楔形体的增加，对船厢启动时的附加水体质量影响很小；当船厢出水速度较大时 ($v_u > 2.15$ m/min)，楔形体的存在增大了启动力，速度越大，启动力增加越大。在工程中，船厢入水速度一般很小，因此认为楔形体的增加对启动力没有影响。

表 4 不同形式船厢出水启动动力

$v_u/(m/min)$	$\sigma_1/(kN/m^2)$		
	平底体	2°楔形体	4°楔形体
0.80	0.98	1.17	1.23
1.34	2.01	1.96	1.74
1.61	3.02	2.72	2.64
1.88	3.02	2.86	2.81
2.15	3.23	3.47	3.60
2.41	3.92	4.30	4.56
2.68	4.86	4.96	5.00

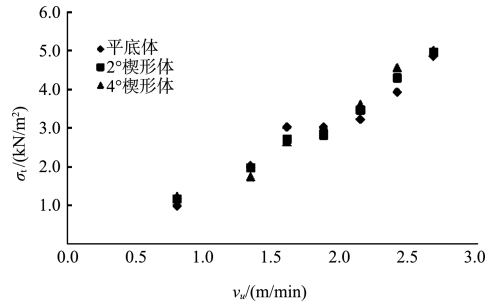


图 8 船厢出水速度与启动力的关系

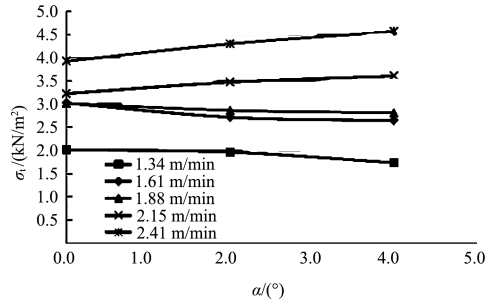


图 9 α 对船厢启动力的影响

总之，船厢出水速度对启动力影响加大，速度越大，启动力越大，而楔形体对启动力的影响较小。

3 不同形式船厢入水水动力特性影响

3.1 船池水面波动影响

不同形式船厢入水，船池内水面最大降低统计值见表 5，入水速度 v_d 与船池水面最大降低值 ΔH_1 之间的关系见图 10，从图 10 可知：1) 当船厢入水速度小于 1.61 m/min 时，船池内水面最大降低值随入水速度的增大而增大，当入水速度大于 1.61 m/min 时，船池内水面最大降低值不随速度的改变而改变，基本控制在 40 cm 左右，其原因应该是由船池形式固定，池内水面最大降低值达到了极限；2) 船厢形式的不同对船池水面降低值影响不大，3 种形式船厢入水池内水面最大降低值基本重合，根本原因在于船厢底缘形式的改变对船厢入水过程水量变化影响不大。

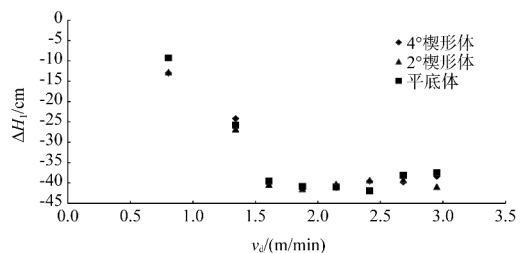


图 10 船池水面最大降低值与入水速度关系

表 5 船池水面最大降低值

$v_d/(m/min)$	$\Delta H_1/cm$		
	平底体	2°楔形体	4°楔形体
0.80	-9.3	-12.8	-13.0
1.34	-25.8	-26.8	-24.2
1.61	-39.6	-40.4	-39.8
1.88	-40.9	-41.5	-41.5
2.15	-41.0	-40.3	-41.2
2.41	-42.0	-39.4	-39.6
2.68	-38.1	-39.3	-39.8
2.95	-37.5	-41.0	-38.4

不同形式船厢入水，池内水面最大壅高值见表 6，入水速度 v_d 、船厢底缘楔形体角度 α 对船池水面壅高 ΔH_2 的影响关系见图 11、12，从图中可以看出：1) 船池内水面最大壅高值随入水速度的增加而增加；2) 船厢形式的改变对船池内水面最大壅高值影响不大；当船厢以 1.34 m/min 入水时，平底船厢较 4°楔形体船厢引起的池内水面最大降低值高了 5.0 cm，其他入水速度下，不同形式船厢入水引起的船池水面壅高差值不超过 2 cm 左右。

总之，船池内水面波动值主要与入水速度有关，与船厢出入船池过程中池内水量的改变有关，由于楔形体的改变在船厢入水过程中对水量改变较小，因此，对船池内水体波动特性影响较小。

表 6 船池水面最大壅高值

$v_d/(m/min)$	$\Delta H_2/cm$		
	平底体	2°楔形体	4°楔形体
0.80	16.9	16.8	17.9
1.34	24.6	20.3	20.5
1.61	29.4	29.7	24.4
1.88	32.0	30.5	30.3
2.15	34.4	34.9	34.4
2.41	38.7	37.2	37.8
2.68	41.6	44.4	42.6

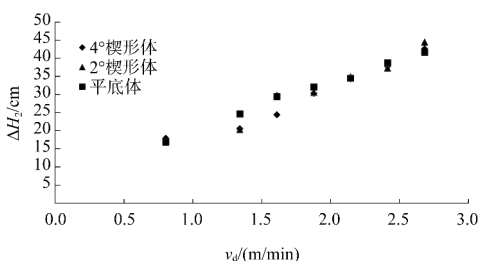


图 11 船池水面壅高与入水速度关系

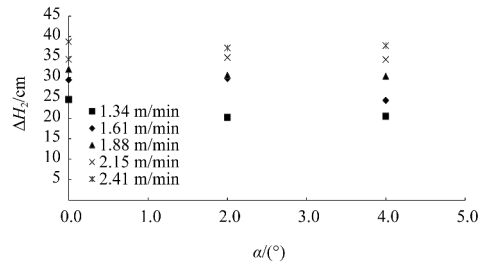


图 12 α 对船池水面壅高值的影响

3.2 船厢入水拍击力影响

不同形式船厢入水所受的拍击力 (σ_s) 见表 7，图 13、14 分别为船厢入水拍击力与入水速度关系、 α 对船厢入水拍击力的影响，可以看出：1) 船厢入水拍击力随入水速度的增加是一个先缓慢增长再迅速增长的过程，其速度变化改变的点在 1.34 m/min；2) 船厢入水拍击力总体上随船厢底缘楔形体角度的增大而减小，当入水速度较小时，拍击力较小，楔形体角度的增大对拍击力的影响也较小；随着入水速度的增大，拍击力显著增大，楔形体在降低入水拍击力方面效果显著，当入水速度大于 1.88 m/min 时，随着楔形体角度增大，拍击力显著减小，4°楔形体形式较平底形式降低幅度在 40% 左右；随着船厢底缘楔形体角度的继续增加，其入水拍击力的降低曲线随着楔形体角度增大，其斜率逐渐减小，当楔形体角度达到 4° 时，楔形体角度的增加对降低拍击力的效果已不明显。

总之，船厢入水拍击力与入水速度、船厢底缘形式有关，但入水速度的影响较大，因此，为降低拍击力，主要是选取合适的入水速度，同时，结合船厢底缘形式的改变，降低入水拍击力对船厢结构的影响；由于楔形体角度的增大会增加船厢水量，结合试验结果认为，船厢底缘楔形体角度选 4° 比较适合。

表 7 船厢入水拍击力

$v_d/(m/min)$	平底体		2°楔形体		4°楔形体	
	P_s/kN	$\sigma_s/(kN/m^2)$	P_s/kN	$\sigma_s/(kN/m^2)$	P_s/kN	$\sigma_s/(kN/m^2)$
0.80	410.78	0.49	374.60	0.45	289.01	0.34
1.34	441.97	0.53	409.58	0.49	251.85	0.30
1.61	518.78	0.62	474.55	0.56	343.27	0.41
1.88	745.02	0.89	541.23	0.64	410.43	0.49
2.15	1161.92	1.38	743.22	0.88	596.31	0.71
2.41	1191.50	1.42	826.12	0.98	756.98	0.90

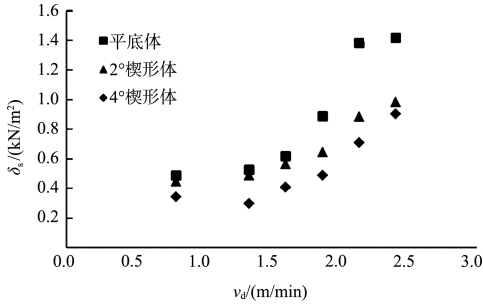


图 13 船厢入水拍击力与入水速度关系

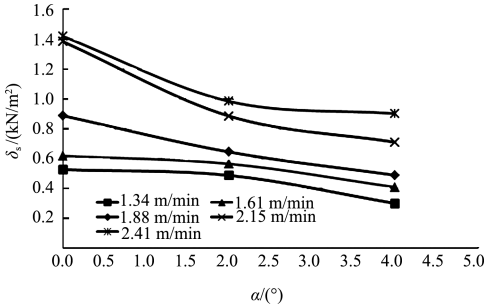


图 14 α 对船厢入水拍击力的影响

3.3 船厢入水附加水动力荷载影响

图 15 为船厢下水停止后钢丝绳受力变化曲线, 定义船厢入水静止后, 船池水位壅高至最大时对应的钢丝绳总提升力为 P_{max} , 当船池水体波动静止后所对应的钢丝绳总提升力为 P_0 , 则定义船厢入水过程中产生的附加荷载为 $P_a = P_{max} - P_0$, 定义 $\kappa = P_a/P_0$, 表征船厢入水过程附加水动力荷载的增加程度。

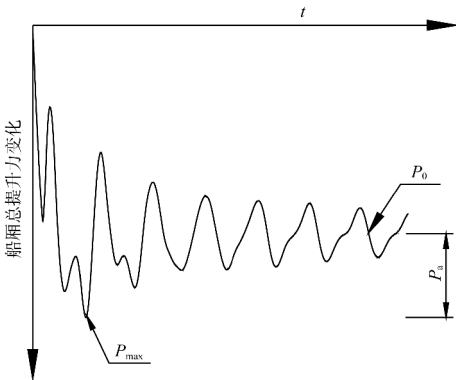


图 15 船厢入水过程总提升力变化过程

表 8 为不同形式船厢入水过程 κ 的统计值, 图 16、17 为船厢入水速度 v_d 、楔形体角度 α 对 κ 的影响, 从图中可以看出: 1) κ 随入水速度的增加而增加, 近似成线性关系; 2) 船厢形式对降低入水附加荷载的影响较小, 同一入水速度下, 3 种形式船厢下水, κ 的最大差值只有 2.7%, 可以认为

船厢形式的改变对船厢入水附加荷载没有影响。

表 8 船厢入水附加荷载

$v_d / (m/min)$	$\kappa / \%$		
	平底体	2°楔形体	4°楔形体
0.80	4.9	4.3	3.2
1.34	8.5	7.9	6.3
1.61	11.0	10.0	8.9
1.88	10.9	10.4	10.7
2.15	13.8	11.8	11.1
2.41	15.3	15.0	13.7

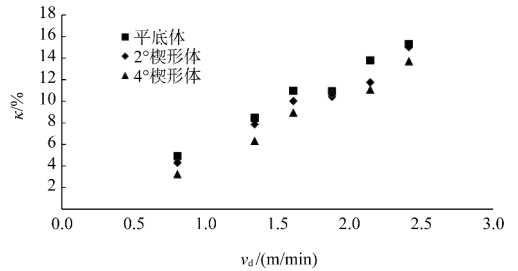


图 16 船厢入水附加荷载与入水速度关系

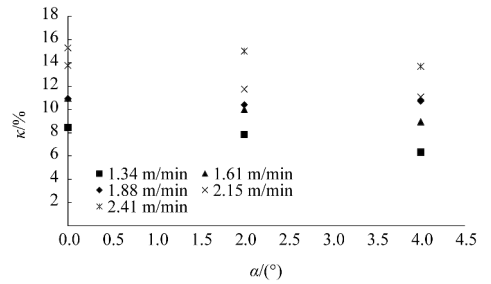


图 17 α 对单位附加水动力荷载的影响

图 18 为不同楔形体船厢以不同速度入水对应的船厢附加水动力荷载, $\lambda = v_d/v_0$, $v_0 = 12 m/min$, 通过最小二乘法对 $\kappa-\lambda$ 进行拟合可得 (表 9):

$$\kappa = 70.19\lambda \quad (1)$$

即

$$P_a/P_0 = 70.19(v_d/v_0) \quad (2)$$

相关系数 $R^2 = 0.9672$, 说明相关性较强。

表 9 $\lambda-\kappa$ 关系

λ	$\kappa / \%$		
	平底体	2°楔形体	4°楔形体
0.07	4.9	4.3	3.2
0.11	8.5	7.9	6.3
0.13	11.0	10.0	8.9
0.16	10.9	10.4	10.7
0.18	13.8	11.8	11.1
0.20	15.3	15.0	13.7

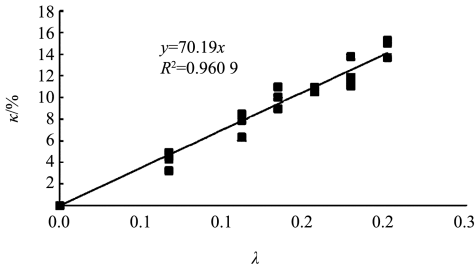


图 18 $\kappa-\lambda$ 关系曲线

4 结语

1) 船厢底缘楔形体角度 α 是影响船厢出水吸附力的主要因素, 船厢吸附力随底缘楔形体角度 α 的增大迅速减小, α 角达到 4° 时, 船厢吸附力值仅为船厢最大提升力的 1% 左右, 已基本可忽略船厢吸附力的影响。

2) 船厢底缘形式对船厢启动力影响较小, 在船厢高速出水情况下, 启动力随船厢底缘楔形体 α 角度增大略有增大, 船厢出水速度小于 2 m/min 时可以忽略 α 对船厢启动力影响。

3) 船厢底缘形式和船厢入水速度是影响船厢拍击力的主要因素, 船厢底缘楔形体 α 达到 4° 时, 相同船厢入水速度的船厢拍击力较平底形式可降低 40% 左右。

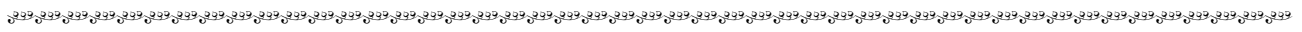
4) 无量纲化后的入水速度及相应的附加水动力荷载经验关系式为式(2)。

5) 综合相关结论, 当船厢底缘采用 4° 楔形体时, 可显著降低船厢出入水过程的吸附力和拍击力, 考虑到船厢楔形体角度的增大带来的船厢水量增大, 进一步增大楔形体角度已无多大意义, 认为船厢底缘采用 4° 楔形体是较优的底缘形式。

参考文献:

- [1] 钮新强, 宋维邦. 船闸与升船机设计[M]. 北京: 中国水利水电工程出版社, 2007.
- [2] 王敬鹏, 胡亚安, 李中华. 下水式钢丝绳卷扬垂直提升升船机水利特性研究综述[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 83-91.
- [3] 包钢鉴, 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.
- [4] 胡亚安, 李中华. 乌江构皮滩 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.
- [5] 王敬鹏. 升船机船厢出入水水动力特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013.
- [6] 胡亚安, 李中华. 乌江构皮滩第一级中间渠道尺度及船舶航行条件研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

上航局中标大小鱼山促淤围涂工程

上航局中标浙江省舟山市岱山县大小鱼山促淤围涂项目大鱼山北部成陆工程, 中标金额为 2.4 亿元, 工期 19 个月。

该工程地处大小鱼山附近海域, 是上航局自大小鱼山促淤围涂一期工程后, 在该地区承接的第 4 个项目, 主要内容包括围堤、陆域回填及地基处理, 其中围堤全长 604 m, 地基处理面积 13 万 m^2 。

http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201611/t20161129_86732.html (2016-11-29)