

# 水力式升船机卷筒制动器 意外上闸风险及应对措施\*

薛淑<sup>1,2</sup>, 胡亚安<sup>1</sup>, 李中华<sup>1</sup>, 李学义<sup>1</sup>

(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,  
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 210098)

**摘要:** 正常运行过程中同步系统卷筒制动器意外上闸是水力式升船机最严重的事故工况之一。结合景洪水力式升船机设计参数, 分析了该事故工况下升船机存在的安全风险, 提出了相应的应对措施和控制指标, 探讨风险预测的理论计算方法, 并通过原型观测试验检验理论计算方法与应对措施的有效性和可靠性。

**关键词:** 水力式升船机; 制动器意外上闸; 事故工况; 风险分析; 控制指标; 应对措施

中图分类号: U 642.1

文献标志码:

文章编号: 1002-4972(2016)12-0209-06

## Risk analysis and counter-measure for braking accidents of drum brakes of hydro-floating ship lift

XUE Shu<sup>1,2</sup>, HU Ya-an<sup>1</sup>, LI Zhong-hua<sup>1</sup>, LI Xue-yi<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Braking accidents of drum brakes which fixed in synchronizing shaft is one of the most serious accidents of hydro-floating ship lift (HFSL). Depend on design parameters of Jinghong HFSL project, the paper analyzes the security risks of ship lift in working condition of the accident, proposes counter-measures and control index. Furthermore, theoretical calculation method of risk prediction is put forward. Through prototype observation tests, the validity and reliability of theoretical calculation method and counter-measures are verified.

**Keywords:** hydro-floating ship lift; braking accidents of drum brakes; working condition of the accident; risk analysis; control index; counter-measure

水力式升船机利用水能作为提升动力, 通过输水系统向竖井充、泄水驱动平衡重升降, 经卷筒转向带动承船厢运行, 能自动调整平衡重淹没深度以适应船厢出入水产生的重力变化, 是我国自主研发的全新升船机形式, 总体布置形式见图1。

水力式升船机顶部安装16组卷筒, 通过同步轴连接形成封闭系统, 每组卷筒均安装一套液压

盘式制动器, 制动器在升船机正常运行时不投入工作, 制动盘处于松开状态, 若制动器液压管路发生压力泄漏, 制动器撑开压力不足以抵挡制动器预压弹簧的收缩力时, 制动器会自动闭合造成意外上闸。此外, 还有一些其他原因导致制动器的意外上闸, 如制动器驱动子站断电、人为误操作等。

收稿日期: 2016-09-16

\*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402002)

作者简介: 薛淑 (1987—), 女, 博士研究生, 研究通航建筑物水力学问题。

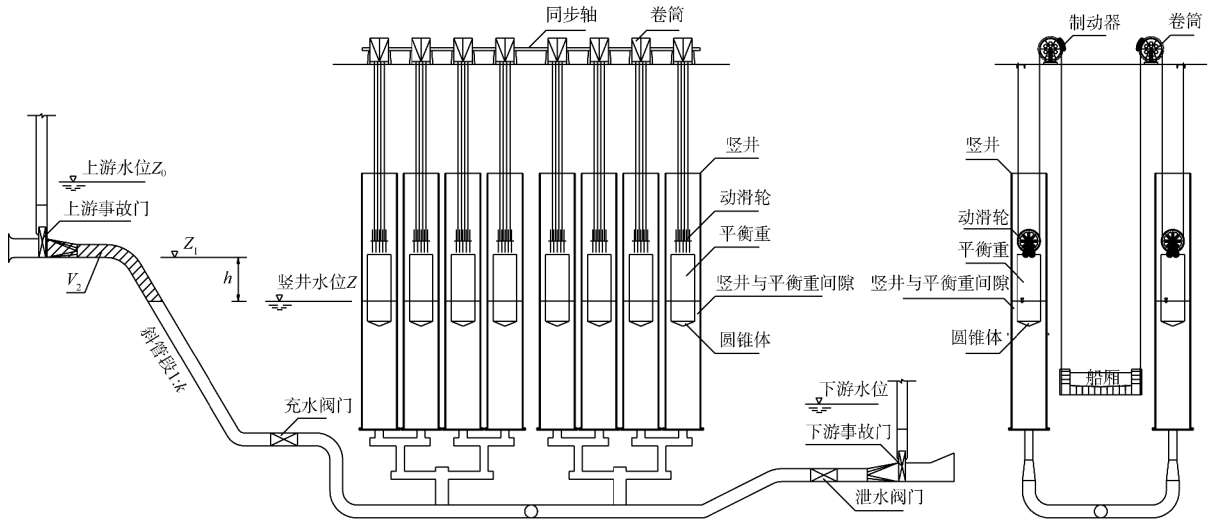


图1 水力式升船机总体布置

水力式升船机在运行过程中意外上闸属于极端事故工况，严重威胁升船机的安全，因此对该事故工况进行风险分析及应对措施研究非常必要。

### 1 制动器意外上闸风险分析

水力式升船机运行原理区别于传统的电力式升船机，制动器意外上闸除了会引起船厢加速度及钢丝绳拉力突变、船厢水面波动增大等问题，还可能对同步轴造成机械破坏——在制动器上闸、承船厢停止运行后，竖井水位将继续变化，平衡重所受浮力会因为竖井水位继续增大或减小而改变，导致卷筒两边出现不平衡力。若没有及时采取有效措施，产生的不平衡力较大，可能引起平衡重漂浮钢丝绳松散或制动力不足的现象，一旦制动力不足，制动盘打滑，相邻同步轴扭矩会迅速增大，甚至引起同步轴断裂等严重后果。鉴于此，本节将分别对充、泄水工况下制动器意外上闸进行风险分析。

#### 1.1 充水工况意外上闸风险分析

输水系统向竖井充水时，若制动器意外上闸，船厢与平衡重立即停止运行，竖井水位继续上升，平衡重浮力增加，卷筒两侧受力不平衡。

1) 若船厢侧重力对卷筒的作用力矩小于制动器的设计制动力矩，即

$$MgR < nT_z R_z \quad (1)$$

制动力在任何情况下满足制动要求，但可能会出现平衡重漂浮、钢丝绳松散脱槽的现象，为避免此类现象发生，制动器抱闸后平衡重浮力变化应小于  $\gamma Mg$ ，则竖井水体增量应满足式(2)

$$V < \frac{\gamma M}{\rho n S_p} \cdot S_i \quad (2)$$

式中： $\gamma$ 为系数，水力式升船机平衡重系统安装动滑轮时  $\gamma = 2$ ，否则  $\gamma = 1$ ； $n$ 为卷筒总套数； $Mg$ 为船厢侧重力(kN)； $R$ 为卷筒上钢丝绳的缠绕半径(m)； $T_z$ 为制动器的设计制动力(kN)； $R_z$ 为制动盘制动半径(m)； $S_p$ 为平衡重截面积(m<sup>2</sup>)； $S_i$ 为平衡重与竖井间的环形间隙总截面积(m<sup>2</sup>)。

2) 若船厢侧重力对卷筒的作用力矩大于制动器的设计制动力矩，即

$$MgR > nT_z R_z \quad (3)$$

卷筒的制动力为控制条件，在某些运行工况下会出现制动力不足船厢下滑的现象，为避免制动力不足，制动器抱闸后平衡重浮力变化应小于  $\gamma n T_z R_z / R$ ，竖井水体增量应满足下式：

$$V < \frac{\gamma T_z R_z}{\rho g R S_p} \cdot S_i \quad (4)$$

#### 1.2 泄水工况意外上闸风险分析

竖井经输水系统向下游泄水时，若制动器意外上闸，船厢与平衡重立即停止运行，竖井水位继续下降，平衡重浮力减小，卷筒两侧受力不平衡。

为了减小竖井水流对平衡重的横向扰动, 水力式升船机平衡重底部设计成倒立的圆锥体, 外形使流态更平顺, 见图 1。当竖井水深降至锥底, 卷筒两侧不平衡力产生的力矩正好与制动力矩设计值平衡时, 平衡重的临界淹没水深变化(从锥底算起)为:

$$\Delta h_x = \left( \frac{\gamma n T_z R_z}{\rho g R} - n V_d \right) / S_p \quad (5)$$

式中:  $V_d$  为平衡重底部圆锥体积。

1) 若运行时的平衡重的淹没水深  $\Delta h \leq \Delta h_x$ , 在任何情况下, 制动力能够满足要求。

2) 若运行时的平衡重的淹没水深  $\Delta h > \Delta h_x$ , 则可能出现制动力不足船厢向上滑动的现象。根据制动力设计值, 制动器抱闸后, 为避免制动力不足, 平衡重浮力变化应小于  $\gamma n T_z R_z / R$ , 竖井流出的水体应满足式(4)。

## 2 制动器意外上闸风险预测方法

如上文所述, 在制动器上闸、承船厢停止运行后, 为保障升船机安全, 应立即采取截流措施控制竖井水位变化量, 通常在升船机自动控制程序中立即执行关闭输水阀门及上、下游事故门的指令(输水阀门及上、下游事故门的布置见图 1), 但由于输水阀门、事故门完全关闭需要花费一定时间, 在此过程中竖井水位将继续变化。

本节根据公式(6)~(8)推导输水阀门、事故门关闭过程中的竖井增加或减少的水体, 计算平衡重浮力变化, 从而判断制动力是否满足条件, 进行制动器意外上闸风险预测。

$$V = \int_0^{t_0} Q dt \quad (6)$$

$$Q = \mu A \sqrt{2gh} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi}} \quad (8)$$

式中:  $t_0$  为关门时间(s);  $\mu$  为流量系数;  $\xi$  为阻力系数。

以景洪水力式升船机为例, 通过理论推导介绍制动器意外上闸事故工况竖井水体的变化量计算方法, 计算参数为: 卷筒 16 套, 单套制动力设

计值 900 kN, 制动半径 2.40 m, 卷筒名义直径 4.25 m, 平衡重直径 6.30 m, 平衡重底部椎体高 1.80 m, 竖井直径 6.50 m, 主管道截面积 4.91 m<sup>2</sup>, 输水阀门面积 2.01 m<sup>2</sup>, 事故门与充水阀门间斜管坡度 1:0.7。

### 2.1 充水工况意外上闸竖井水体增量理论计算

首先根据式(1)~(4)对充水工况下制动器意外上闸进行风险分析:

当船厢侧重力  $Mg < 14\,400$  kN 时(船厢水深小于 0.55 m), 有可能出现平衡重漂浮钢丝绳松散脱槽的现象, 为避免平衡重漂浮, 制动器抱闸后, 竖井水体增量  $V < 0.198$  m<sup>3</sup>。

当船厢侧重力  $Mg > 14\,400$  kN 时(船厢水深大于 0.55 m), 卷筒的制动力为控制条件, 为避免制动力不足, 制动器抱闸后, 竖井水体增量  $V < 285$  m<sup>3</sup>。

下文对仅关闭充水阀门、仅关闭上游事故门、充水阀门与上游事故门同时关闭 3 种应对措施产生的竖井水体增量分别进行理论推导。

#### 1) 仅关闭充水阀门。

充水阀门系统含“一主两辅”3套 VAG 阀门, 布置形式见图 2。

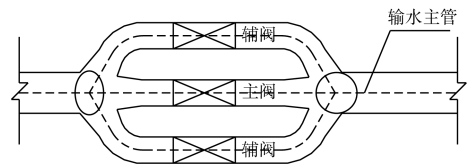


图 2 “一主两辅”输水阀门布置形式

竖井增加的水体  $V$  为:

$$V = \int_0^{t_z} Q_z(t) dt + \int_0^{t_f} Q_f(t) dt \approx \sum \frac{S_k \sqrt{2g(z_0 - z)}}{\sqrt{\xi_z}} \cdot$$

$$\left( \frac{t_z}{100} dn_z \right) + 2 \sum \frac{S_k \sqrt{2g(z_0 - z)}}{\sqrt{\xi_f}} \cdot \left( \frac{t_f}{100} dn_f \right) \quad (9)$$

式中:  $Q_z$ 、 $Q_f$  为主、辅阀流量(m<sup>3</sup>/s);  $t_z$ 、 $t_f$  为主、辅阀关闭的时间(s);  $\xi_z$ 、 $\xi_f$  为主、辅阀阻力系数, 见表 1;  $n_z$ 、 $n_f$  为主、辅阀开度;  $S_k$  为阀门面积(m<sup>2</sup>);  $z_0$  为上游水位(m);  $z$  为竖井水位(m)。

表1 充水阀门各开度的阻力系数

充水辅阀			充水主阀		
开度 $n_1/\%$	流量系数 $\mu_1$	阻力系数 $\xi_1$	开度 $n_2/\%$	流量系数 $\mu_2$	阻力系数 $\xi_2$
10	0.00	193 600	10	0.01	33 057
20	0.01	40 000	15	0.01	27 777
30	0.01	5 102	20	0.01	10 412
35	0.02	2 500	25	0.02	2 921
40	0.03	1 498	30	0.03	1 275
50	0.04	566	35	0.05	473
60	0.06	318	40	0.06	248
65	0.06	241	45	0.10	94
70	0.07	226	50	0.15	46
80	0.09	120	55	0.18	30
90	0.12	72	60	0.23	19
100	0.14	50	65	0.26	15

2) 仅关闭上游事故门。

①竖井水位小于上游事故门底高程  $z_1$  时 (图1), 竖井增加的水体包括两部分:

$$V = V_1 + V_2 \quad (10)$$

式中:  $V_1$  为事故门关闭过程上游流经事故门的水体;  $V_2$  为上游事故门后水平段与斜管段水体。

事故门关闭过程上游流经事故门的水体  $V_1$  计算方法如下:

根据关闭事故门时主、辅开度, 可以获得阀门段阻力系数, 将阀门段阻力系数  $\xi_1$  换算到主管道面积的表达式为:

$$\xi_1 = \frac{\xi_2 \xi_1 A^2}{(\sqrt{\xi_1} + 2\sqrt{\xi_2})^2 S_k^2} \quad (11)$$

式中:  $A$  为主管道面积 ( $m^2$ )。

事故门阻力系数  $\xi_2$  根据闸孔出流的流量系数公式估算:

$$\mu_2 = 0.6 - 0.176 \cdot \frac{e}{H_1} \quad (12)$$

式中:  $e$  为事故门开启高度;  $H_1$  为事故门承受水头。换算到主管面积的输水阀门阻力系数的值, 见表2, 表中小开度 ( $<50\%$ ) 阻力系数相差较大, 每5%开度给出一个值, 大开度 ( $>50\%$ ) 阻力系数相差较小, 每10%开度给出一个值。根据表1和表2可知, 事故门的开度  $n > 20\%$  时, 对输水系统阻力系数贡献很小, 可以忽略不计; 事故门的开

度  $0\% < n < 20\%$  时, 对输水系统阻力系数影响较大。

表2 上游事故门各开度的阻力系数

$n_2/\%$	$E/m$	$\mu_2'$	$\xi_2'$	$S_2/m^2$	换算到主管的 阻力系数 $\xi_2$
1	0.05	0.60	2.78	0.14	3 677.0
5	0.23	0.60	2.79	0.68	148.0
10	0.45	0.60	2.81	1.35	37.0
15	0.68	0.59	2.83	2.03	17.0
20	0.90	0.59	2.84	2.70	9.4
25	1.13	0.59	2.86	3.38	6.1
30	1.35	0.59	2.88	4.05	4.2
35	1.58	0.59	2.89	4.73	3.1
40	1.80	0.59	2.91	5.40	2.4
45	2.03	0.58	2.93	6.08	1.9
50	2.25	0.58	2.95	6.75	1.6
60	2.70	0.58	2.98	8.10	1.1
70	3.15	0.58	3.02	9.45	0.8
80	3.60	0.57	3.05	10.80	0.6
90	4.05	0.57	3.09	12.15	0.5
100	4.50	0.57	3.13	13.50	0.4

注:  $n_2$  为事故门开度,  $e$  为事故门开启高度,  $\mu_2$  为闸孔流量系数,  $\xi_2$  为闸孔阻力系数,  $S_2$  为闸孔面积。

上游事故门阻力系数拟合见图3。

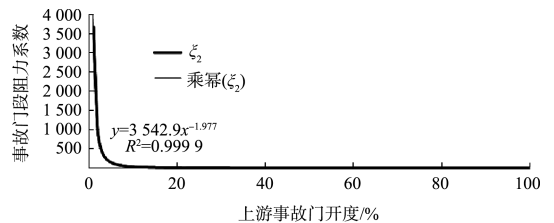


图3 上游事故门阻力系数拟合

输水系统流量随事故门开度变化, 输水系统流量系数为:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi_1 + \xi_2}} \quad (13)$$

输水系统的流量为:

$$Q(n_1) = \mu A \sqrt{2g(z_0 - z)} \quad (14)$$

将式(11)~(14)代入式(15)可得到事故门关闭过程上游流经事故门的水体  $V_1$ :

$$V_1 = \int_0^{t_0} Q(t) dt = \int_0^{100} Q(n_1) \left( \frac{t_0}{100} dn_1 \right) \approx \sum Q(n_1) \times \left( \frac{t_0}{100} dn_1 \right) \quad (15)$$

上游事故门后水平段与斜管段水体 $V_2$ 为:

$$V_2 = V_0 + A(z_1 - z) \sqrt{1 + k^2} \quad (16)$$

式中:  $V_0$  为上游事故门后水平段管道水体。

② 竖井水位大于上游事故门底高程 $z_1$ 时, 容易理解, 上游事故门后至斜管段前的水平管道部分在关闭事故门前后都充满水, 因此竖井增加的水体积等于关门过程中上游流经事故门的水体积。竖井增加的水体 $V = V_1$ 。

3) 充水阀门与上游事故门同时关闭。

充水阀门与上游事故门同时启动关闭程序, 即使上游事故门用较短的时间完全关闭, 阀门前斜管段水体依然能够流经充水阀门进入竖井, 且水位差较大, 上游事故门起到的截流作用微乎其微。因此, 过流水体体积估算可参考仅关闭充水阀门的工况。这样计算是偏安全的, 未计及上游事故门截流作用。景洪水力式升船机上游事故门落门时间为 27 s, 主阀和辅阀在现有运行方式下的最大开度分别为 65% 和 100%, 阀门关终历时分别为 31 s 和 47 s, 上游事故门在关至能影响系统流量系数的时段内, 阀门的流量系数已经很小, 从上游流过的水体较小, 而事故门后的水体是一样的。

极限情况, 事故门关闭时间为 0 s, 水体就是事故门后的平管和斜管段水体, 和阀门流量系数无关。另外, 事故门后的水体是否会完全流到竖井, 取决于阀门关闭时间, 现在全部计入也是极端不利条件。

## 2.2 泄水工况意外上闸竖井水体变化量理论计算

根据式(5)~(6)对泄水工况下制动器意外上闸进行风险分析: 平衡重的临界淹没水深(从锥底算起)为 5.37 m。若运行时的平衡重的淹没水深 $\Delta h \leq 5.37$  m, 在任何情况下, 制动力能够满足要求; 若运行时的平衡重的淹没水深 $\Delta h > 5.37$  m, 则可能出现制动力不足船厢向上滑动的现象。根据制动力条件, 制动器抱闸后, 竖井减少的水体 $V < 285 \text{ m}^3$ 。

1) 仅关闭泄水阀门。

计算方法同充水工况, 景洪水力式升船机泄

水阀门各开度的阻力系数见表 3。

表 3 泄水阀门各开度的阻力系数

泄水辅阀			泄水主阀		
开度 $n_1/\%$	流量系数 $\mu_f$	阻力系数 $\xi_f$	开度 $n_z/\%$	流量系数 $\mu_z$	阻力系数 $\xi_z$
10	0.003	111 111	10	0.004	81 633
20	0.006	27 778	20	0.010	11 080
30	0.009	12 346	25	0.017	3 460
40	0.020	2 500	30	0.031	1 041
50	0.037	731	35	0.045	494
60	0.051	385	40	0.078	164
70	0.065	235	45	0.117	73
80	0.085	137	50	0.165	37
90	0.112	79	55	0.228	19
100	0.165	37	60	0.290	12

2) 仅关闭下游事故门。

下游事故门关闭过程中, 竖井减少的水体等于流经下游事故门的水体 $V = V_1$ ,  $V_1$ 的计算方法见式(15)。下游事故门阻力系数拟合见图 4。

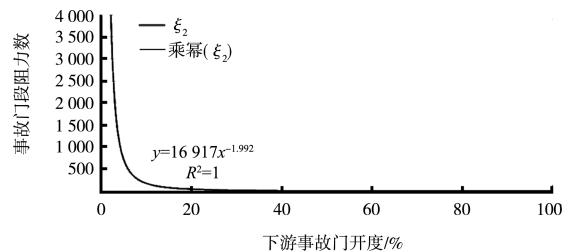


图 4 下游事故门阻力系数

3) 泄水阀门与下游事故门同时关闭。

若下游事故门关闭时间大于泄水阀门关门总时间, 则竖井减少水体的估算同仅关闭泄水阀门工况; 若下游事故门关闭时间小于泄水阀门关门总时间, 则下游事故门起到截流作用, 竖井减少的水体小于仅关闭泄水阀门工况。

## 3 理论计算精度验证及应对措施

为了确保水力式升船机安全的前提下验证理论计算的精度, 在现场进行承船厢急停原型观测试验, 即制动器不抱闸, 船厢在运行过程时突然关闭输水阀门、事故门, 观测在关门过程中竖井水体的变化量, 与理论计算的过水体积进行比较。由表 4 可见, 船厢急停工况计算的过流体积与实测值相比, 误差在 5% 以内, 计算结果可靠。

表4 船厢急停过水体积计算误差

工况	主阀开度/%	辅阀开度/%	关阀前总流量/(m <sup>3</sup> /s)	积分计算竖井水体变化/m <sup>3</sup>	实际竖井水体变化/m <sup>3</sup>	误差/%
(充)关阀	64	71	17.5	176.30	180.5	-2.3
(充)关阀、落事故门	64	71	17.5	175.80	180.5	-2.6
(充)落事故门	64	71	18.0	731.25	732.8 (制动力不足)	-0.1
(泄)关阀	55	100	19.0	236.00	239.0	-1.3
(泄)关阀、落事故门	55	100	19.0	221.50	228.2	-2.9
(泄)落事故门	55	100	20.0	401.00	398.3 (制动力不足)	0.7

#### 4 水力式升船机制动器意外上闸预防及应对措施

根据理论计算公式可知,在关阀、闭门过程中产生的竖井水体变化量与当前主、辅阀开度,竖井水位差及阀门、事故门完全关闭所需时长有关。

因此,为了预防水力式升船机制动器意外上闸产生不良后果,应采取以下措施:

- 1) 尽量缩短输水阀门及事故门的关闭时间。
- 2) 根据表4景洪水力式升船机的原型观测结果可知,一旦抱闸事故工况发生,仅关事故门非常危险,极易导致制动力不足,最保险的措施是输水阀门与事故门同时关闭,可显著降低风险。

3) 水力式升船机输水阀门的运行开启方式必须满足在任意时刻关阀、落门过程中产生的竖井水体变化量均在容许范围内,即主、辅阀门各开度组合下的作用水头  $\Delta H$  应满足

$$f(n_z, n_f, \Delta H) \leq V_{容许} \quad (17)$$

#### 5 结语

1) 水力式升船机在运行过程中制动器意外上闸可能造成平衡重漂浮、钢丝绳松散或制动力不足、同步轴发生机械破坏的严重后果。

2) 本文提出的计算公式可较准确地预测制动器抱闸后,输水阀门、事故门在关闭过程中竖井水体变化,从而评估升船机存在的安全风险。

3) 通过采取同时关闭事故检修门和输水阀门的应对措施能够有效预防和规避制动器意外上闸产生的风险,保障水力式升船机的安全。

#### 参考文献:

- [1] 胡亚安,王新,薛淑,等.景洪水力式升船机原型观测分析工程分报告之七——典型事故工况及运行方式优化报告[R].南京:南京水利科学研究院,2016.
- [2] 马仁超,魏源.云南澜沧江景洪水电站水力式升船机运行主要事故工况分析报告[R].昆明:昆明勘测设计院有限公司,2016.
- [3] 胡亚安,李中华.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] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].

( 本文编辑 武亚庆)

### 编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动,他们建立伪网站,利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明,从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址:www.sygc.com.cn,敬请广大读者和作者周知并相互转告。