

优化输水方式提高三峡船闸通过能力措施研究

曹光荣¹, 胡亚安², 高 雄³

(1. 武汉大学经济与管理学院, 武汉 430072; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029;

3. 长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443002)

[摘要] 探讨了三峡船闸四级运行方式下二闸首作为首级运行时一闸室水体波动特性; 阐述了波动形成的机理, 分析了二闸首阀门运行方式对一闸室波动的影响; 提出了满足一闸室待闸安全要求的阀门开启方式; 通过实船试验检验了一闸室待闸船舶停泊条件, 总结了一闸室待闸调度方式。运行实践表明, 三峡船闸完建期实行四级运行方式下, 将下行船舶由靠船墩移至一闸室满闸室待闸, 可提高船闸日均通过闸次近 3 个, 通航效益明显。

[关键词] 三峡船闸; 输水方式; 水流条件; 通过能力

[中图分类号] TU641 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)12-0075-06

三峡船闸采用双线连续五级布置, 其总水头 113.0 m, 因上下游水位的变幅分别达 30 m 和 11.8 m, 船闸运行方式较为复杂。根据批准的三峡工程初步设计, 水库运行分围堰发电、初期和后期三期运行。在上游水位 135.0 ~ 145.0 m 运行条件下, 船闸采用后四级运行, 第二闸首作为首级, 大部分情况下第三级需要补水, 第二闸首阀门将作补水阀门运行; 当水位抬升至 152.4 m 以上, 船闸五级运行。船闸为适应不同运行水位需要, 第一、二闸首的门槛和闸门采用了分两次建设的方案。初期运行时一、二闸首人字门门槛高程为 131.0 m, 对应于运行水位 135.0 ~ 156.0 m。2006 年 9 月 15 日和 2007 年 1 月 20 日, 三峡南线船闸及北线船闸先后进入完建改造阶段, 一、二闸首门槛高程将由 131.0 m 加高至 139.0 m, 与此同时上游运行水位也由 135.0 m 逐渐抬高至 145.0 ~ 156.0 m。在此期间船闸仅一线通航, 航运压力较大。经过原型调试和理论计算, 通过采取优化阀门开启方式等措施, 在库水位 152.4 ~ 156.0 m 条件下, 船闸可以安全地采用后四级运行, 避免了完建期五级运行方案利用上游事故检修门当工作闸门使用而大大影响船闸通航效率的问题。在

船闸四级运行方式下, 下行船舶自靠船墩至进入二闸室, 其耗时达 50 min, 比各闸室之间的移泊时间要多 30 min 左右。若能利用一闸室待闸, 就可缩短近 1 000 m 的距离, 节省船舶进闸时间, 从而提高船闸通过能力。

1 三峡船闸一闸室波动特性分析

在上游 139.0 m 蓄水位, 二闸首阀门充水工况下, 二闸首阀门采取以 $t_v = 2$ min 的全开速率开至 60% 的局部开启方式运行时, 二闸首人字门前水位波动过程线及一闸首口门区流速如图 1、图 2 所示。可见一闸室最大波幅达 0.98 m, 一闸首口门区最大流速约为 1.46 m/s。计算的一闸室最大纵向比降为 0.15%, 一闸室的停泊条件不能满足船舶满闸室待闸的安全要求。

在三峡船闸四级运行方式下, 一闸室成为船舶进入二闸室的一部分航道, 二闸室充水概化图如图 3 所示。

二闸室充水工况下, 基本方程组如下:

[收稿日期] 2007-03-12

[作者简介] 曹光荣(1972-), 男, 湖北大冶市人, 武汉大学博士生, 高级工程师

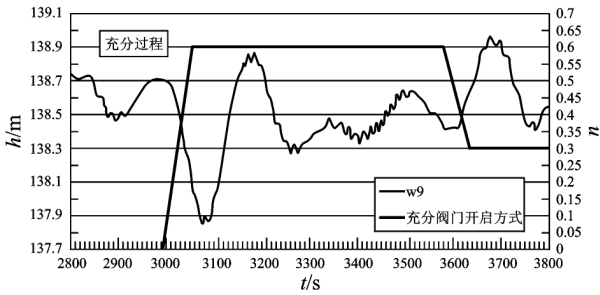


图1 一闸室水位波动过程线(2min 开启)

Fig. 1 The water level fluctuation progress in chamber 1

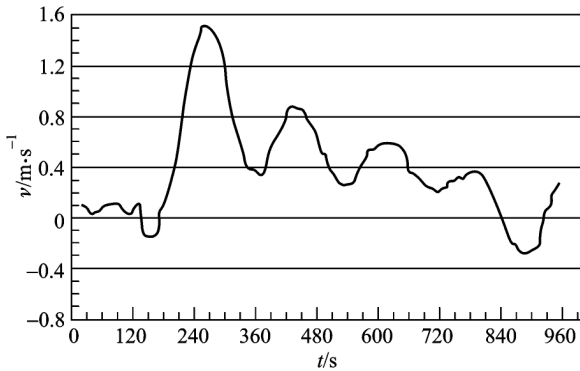


图2 一闸首口门区流速(2min 开启)

Fig. 2 The velocity of flow at shiplock head

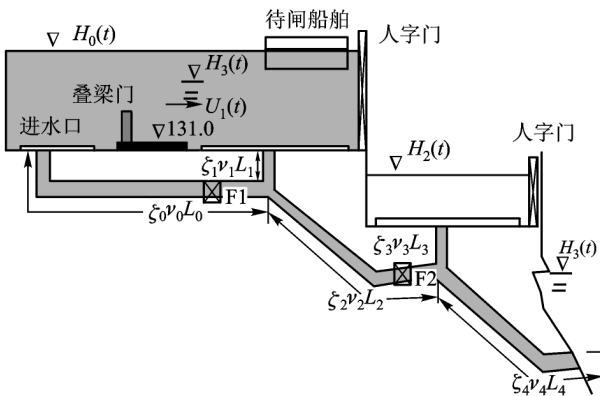


图3 三峡船闸四级运行方式二闸室充水概化图

Fig. 3 The water-filling procedure in chamber 2 under the four steps operating mode

$$A_1 v_1(t) = u_1(t) (H_1(t) - \nabla_0) B + \frac{dH_1(t)}{dt} \Omega \quad (1)$$

$$A_0 v_0(t) + A_1 v_1(t) = A_2 v_2(t) \quad (2)$$

$$A_2 v_2(t) = A_3 v_3(t) \quad (3)$$

$$A_2 v_2(t) = \Omega \frac{dH_2(t)}{dt} \quad (4)$$

$$H_0(t) - H_2(t) = \xi_0(t) \frac{v_0^2(t)}{2g} + \xi_2(t) \frac{v_2^2(t)}{2g} + \xi_3(t) \frac{v_3^2(t)}{2g} + \frac{L_0}{g} \frac{dv_0(t)}{dt} + \frac{L_2}{g} \frac{dv_2(t)}{dt} + \frac{L_3}{g} \frac{dv_3(t)}{dt} \quad (5)$$

$$H_1(t) - H_2(t) = \xi_1(t) \frac{v_1^2(t)}{2g} + \xi_2(t) \frac{v_2^2(t)}{2g} + \xi_3(t) \frac{v_3^2(t)}{2g} + \frac{L_1}{g} \frac{dv_1(t)}{dt} + \frac{L_2}{g} \frac{dv_2(t)}{dt} + \frac{L_3}{g} \frac{dv_3(t)}{dt} \quad (6)$$

$$H_0(t) - H_1(t) = \xi'_1 \frac{u_1^2(t)}{2g} \quad (7)$$

式中 $H_0(t)$ 、 $H_1(t)$ 、 $H_2(t)$ 分别为上游引航道、一闸室及二闸室水位; ∇_0 为叠梁顶高程; A 为各廊道计算断面面积; B 为闸室宽度; ξ 为各廊道阻力系数; v 为各廊道计算断面流速; L 为各廊道惯性换算长度; Ω 为闸室水域面积; $u_1(t)$ 为一闸首口门区断面平均流速; ξ'_1 为闸首口门区阻力系数; g 为重力加速度。

在二闸室充水时, 二闸室的水体一部分通过上游引航道进水口取自船闸一闸首口门外的上游水域, 另外一部分通过一闸室底板的 96 个进(出)水孔(对二闸室充水而言)取自一闸室水域。由于上游水域水面辽阔, 因此由引航道取水时取水处的水面可认为是不变的, 而一闸室水域(长 280.0m × 宽 34.0m) 由于受一闸室两侧闸墙及关闭的二闸首人字门的约束, 取水时一闸室水面将下降, 其取走的水体将由一闸首口门断面进水补充, 从而形成一闸室内的纵向水流及水面往复波动。

波动的传递又受到一闸室闸底 96 个进水孔(单孔长 5.0 m × 宽 0.14 m) 取水流量的影响, 其特性较为复杂。在二闸室充水过程中, 由于一闸室到二闸室的阻力系数、惯性换算长度均小于上游引航道进水口到二闸室的阻力系数和相应惯性换算长度, 因而二闸室充水的水体主要取自一闸室水域, 在充水初期其值更大, 尤其在二闸首阀门开启瞬间, 几乎全部取自一闸室。

在二闸首阀门开启充水初期, 随着一闸室水面下降, 在一闸首口门上下游产生水位差, 此水位差形成了由口门区向二闸首推进的正向波, 以补充被二闸室取走的水体。当这个推进波尚未到达一闸室底

部进(出)水孔前端时(波前到达第一个进水口时间 $t_1 = l_1 / \sqrt{gH}$, l_1 为一闸首口门至一闸室进(出)水口前端的长度, H 为一闸室水深)的波前坡降较陡。在二闸首人字门前,其补充的水体较少,水位最低,推进波的波高减少,从而在二闸首人字门处封闭端形成的反射波也较小。而且此反射波在向上游推进时其部分流量又被各进(出)水孔逐渐取走,因此,其反射波的坡前坡降较小,在一闸室水体波动的全过程中未能形成反向水流。

由此可知,二闸室充水时,一闸室的水体波动主要由两类波动所组成,一是由二闸室充水时部分水体取自一闸室所产生的一闸室整体水面变化,二是由一闸首口门非恒定进水流量所产生,向二闸首推进并逐步衰减的正向波。这两类波动各自按其自身规律变化及运动并相互叠加,形成一闸室较为复杂而又特殊的波动现象。第一类波动变化较大,是影响一闸室水体波高大小的主要因素,而第二类波动的幅值较小,是推进波,是影响一闸室水面坡降的主要因素。

一闸室一端为船闸副导墙外上游水域的开口端,另一端为二闸首关闭的人字门形成的封闭端,构成了一闸室水体波动的边界条件。设船闸副导墙口门到二闸首人字门长度为 L ,波速为 C ,由口门传递至一闸室封闭端的时间为 $t = L/C$ 。在上述边界条件下,一闸室水体波动周期 $T = 4t$ 。在 $\Delta t = 2t$ 时,二闸首人字门前水位降至最低,一闸室水面纵向比降最大。近似认为二闸首阀门开启过程流量呈线性增长,在 $2t$ 的时段,不考虑一闸首口门外水体的补充,一闸室取走的水量为 $1/2 Q_{2t} \times 2t = Q_{2t} \times t$, Q_{2t} 为阀门开启 $2t$ 时刻的流量,一闸室水位下降幅度 $\Delta H = (Q_{2t} \times t) / \Omega$,而 $t = (L/C)$, $C = \sqrt{gH}$ (H 为一闸室水深),因此有:

$$\Delta H = (Q_{2t} \times L) / (\Omega \times \sqrt{gH}) \quad (8)$$

由于二闸首人字门前的水体补充较少,可以认为在 $0 \sim 2t$ 充水时段二闸首人字门前的最大波幅 $\Delta h_{\max} = \Delta H$,由此形成的最大纵向比降为:

$$I_{\max} = \Delta h_{\max} / L = Q_{2t} / (\Omega \times \sqrt{gH}) \quad (9)$$

典型水位一闸室沿程各测点最大波幅及流速表明,自一闸首口门至二闸首,波幅沿程逐渐增大,而纵向流速沿程逐渐减小,至二闸首人字门,波幅最大,流速为零;一闸首口门流速最大,波幅最小。

2 二闸首阀门开启方式对一闸室水流条件和二闸室输水时间的影响

根据式(8)及式(9),一闸室水体最大波幅及最大水面比降与 $T/2$ 时刻的流量成正比,流量越大,波幅和纵向比降也越大。因此,通过调整二闸首阀门开启方式,减小充水流量,预期可以降低一闸室水体波动及流速。

调整二闸首阀门开启方式以减小一闸首取水流量较简单的方法有两种,一是阀门开启速率不变(仍为 $t_v = 2 \text{ min}$),减小阀门的停机开度;另一种是放慢阀门开启速率,而阀门停机开度不变($n = 0.6$)。由于减小停机开度对输水时间影响相对较大,且较快的开启速率的惯性大,对水体的扰动作用也就大,为此重点研究了开启速率的影响。

研究了 139.0 m 水位下二闸首阀门开启速率对一闸室水面波动的影响。在阀门以 $t_v = 2 \text{ min}$ 或 6 min 速率都开至 60% 停机输水的方式下,由于波动的周期不会改变,在阀门开启至闸室出现波谷的 $T/2$ 时段,约 80 s 时,2 min 开启速率所对应的阀门开度已经达到设定的 60%,输水流量最大,约 $318 \text{ m}^3/\text{s}$;而 6 min 开启速率所对应的阀门开度仅为 22%,对应的输水流量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。显然放慢开启速率后在相同时刻流量显著减小,因此一闸室水位波动明显减小。不同开启速率下一闸室水位最大水面波幅及一闸首口门区流速对比显示:与开启速率 $t_v = 2 \text{ min}$ 相比, $t_v = 6 \text{ min}$ 开启时一闸室纵向水面平均坡降由 0.1% ~ 0.15% 降至 0.035% ~ 0.05%,11#系船柱断面最大水面波幅由 0.98 m 降至 0.46 m,一闸首口门区及一闸室 1#系船柱最大纵向流速由 1.46 m/s 和 1.20 m/s 分别降至 0.82 m/s 和 0.65 m/s。

三峡船闸上游水位升高后,二闸首阀门的运行水头、一闸室的淹没水深也相应增加,二闸首如果仍维持原来 139.0 m 水位时的输水方式,即使一闸室水力学条件满足一闸室船舶待闸的需要,二闸室充水时间也将达到 17 min 以上,影响过闸效率。

随着一闸首叠梁门放入高度的不同,试验研究了不同水位下二闸首分别采取阀门局部开启和间歇开启的运行参数(见表 1),试验结果表明:

1) 上游 144.0 ~ 153.7 m 水位一闸首不下放叠梁门,或上游 153.7 ~ 156.0 m 水位下放三节叠梁门时,二闸首阀门采用连续开启的输水方式可以满足

一闸室船舶满闸室待闸的需要,输水时间约 15 min;

2) 上游 154.5 ~ 156.0 m 水位、下放四节叠梁门时,二闸首阀门采用间歇开启输水方式可以满足一闸室船舶满闸室待闸的需要,输水时间约 15 min。

表 1 阀门间歇开启二闸室输水时间统计表

Table 1 The water-filling time of chamber 2 when valve lapse-opening

序号	输水方式	中间停机开度/%	最终开度/%	动水关阀水头/m	二闸室充水时间/s
1	双边	50	80	0.8	948
2	双边	50	100	1.8	916
3	单边	70	100	1.0	1 490

3 一闸室水深对波动特性的影响

在相同的开启速率下,一闸室波速随上游水位的升高,即一闸室水深的增加而相应地增大,波动周期缩短,一闸室波幅和纵向比降也随之减小。实测结果一闸室最大波幅与其水深的 0.5 次方成反比,与式(8)一致。在 139.0 ~ 144.0 m 水位,一闸室水位波动在二闸室充水全过程中均较明显,最大波幅可达 0.6 m,闸室纵向比降 0.1%,当水位超过 145.0 m 时,一闸室波动特征仅在二闸首阀门开启过程较为明显,在阀门开到位后波动明显减弱,最大波幅仅 0.10 ~ 0.15 m,闸室最大纵向比降基本不变,约为 0.015%。

表 2 145 m 水位一闸室船舶待闸实船试验测试结果

Table 2 the test results of ship-awaiting in chamber 1 under 145m water level

组次	水头/m	船型	载重/t	停泊位置	最大波幅/m	最大比降/%	最大流速/ $m \cdot s^{-1}$		最大系缆力/kN	
							断面 1	断面 2	船首	船尾
1	18.87	单机驳	1250	闸室中部	0.17	0.0083	0.37(4#柱)	-	7.0	10.0
2	19.25	单机驳	3500	前半闸室	0.16	0.0115	0.18(7#柱)	-	12.0	10.0
3	19.52	单机驳	2800	后半闸室	0.17	0.0142	0.55(1#柱)	0.44(3#柱)	22.0	24.0
4	19.52	中型船队	4000	闸室中部	0.14	0.0269	-	0.31(6#柱)	37.8	38.5
5	19.83	大型船队	6000	整个闸室	0.12	0.0328	0.48(1#柱)	-	12.0	6.0

在上游水位蓄至 153.0 m 以上时,从保证北线船闸运行安全的角度出发,一闸首口门需放置四节叠梁门,每节叠梁门高度为 3.8 m。当一闸首叠梁门放下后,由于减少了一闸首进水断面面积,增强了纵向水流,并增大了叠梁门前后的水位差,形成了薄壁堰顶水流,还使一闸首口门处的波浪反射特性有所改变,影响了一闸室水面波动规律。同时,纵向水流增强后受进口形式不对称(右侧为与纵轴成锐角的实体付导墙,左侧上部为顺直的浮导堤,下部为直角边缘)及叠梁和两个检修门槽的影响,纵向水流

在上游水位 139.0 ~ 156.0 m 变化范围内,波速 C 约为 8.85 ~ 15.65 m/s,理论计算的周期 T 在 172 ~ 92 s 之间变化,实际的周期约为 210 ~ 100 s,由于影响一闸室水体波动的因素较多,如叠梁的放置,进口边界等,实际的周期与理论值有一定差异。尤其是放置叠梁后影响了一闸室开口端的条件,将改变其波浪运动特性,从而影响到其周期和波幅。

4 一闸室待闸实船试验研究

一闸室水流波动特性表明,在水位蓄至 145.0 m 以上时,二闸室充水条件下,一闸室波动较小,根据对闸室纵向比降资料的分析,一闸室具备待闸条件。为此,进行了两种特征水位的实船试验。

在 145.0 m 蓄水位,一闸室待闸船舶系缆力测试结果见表 2。为了缩短输水时间,二闸首阀门停机开度增大到 70%。结果表明,整个充水过程各种船舶系缆力最大值小于 40 kN(设计技术参数为纵向 80 kN、横向 50 kN)。船舶以停靠在一闸首口门附近船舷边流速相对较大,但最大值小于 0.6 m/s,尽管个别船舶测试缆绳没有完全系紧,在闸室水流作用下发生一定漂移,实测的最大纵向和横向位移都有 1 m 左右,但船舶的运动惯性并未导致实测系缆力显著增加,船舶系缆力满足设计要求。

的流态也逐步变差,流速分布不均,主流变化并伴随回流、漩涡、流流及涌泡等不良流态,同时在纵向水流到达静水的区域受堰后水面降落影响形成振荡的水面波纹。由此可见,一闸首水流流态因进口不对称、叠梁门的放置、纵向水流的增强而极为复杂,三维特性也较为明显。

为改善因叠梁门的放置引起的口门区水流流态,对二闸首阀门开启方式进行了研究,比较了以下 3 种运行方式:

1) 局部开启:以 $t_v = 6 \text{ min}$ 的速度开至 70%;

2) 局部开启,减小停机开度:以 $t_v = 6 \text{ min}$ 的速度开至 60% ;

3) 间歇开启:以 $t_v = 6 \text{ min}$ 的速度开至 50 % ,停 4 min 后以相同的速度继续开至 100 % 。

表3 155m 水位 4 节叠梁门一闸室船舶待闸实船试验测试成果

Table 3 the test results of ship-awating in chamber 1 under 155m water level when 4-section stoplog gates in shiplock gatefloor 1

组次	水头/m	船型	载重/t	停泊位置	最大波幅/m	最大流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		最大系缆力/kN	
						断面 1	断面 2	船首	船尾
1	22.2	大船队	5000	整个闸室	0.11	0.21(5#柱)	0.46(3#柱)	5.6	33.8
2	22.05	小单船	233	1#~2#系船柱	0.11	1.15(1#柱)	0.75(2#柱)	-	3.2
3	22.2	单船	600	1#~2#系船柱	0.10	0.5(口门)	0.2(浮堤)	2.0	19.8
4	22.2	单船	1500	1#~3#系船柱	0.10	0.8(1#柱)	-	0.7	7.6

在上游 155.0 m 水位放置 4 节叠梁门后,在相同的系缆方式下,因船尾受到口门区复杂流态的影响较大,船尾系缆力明显大于船首,但系缆力均满足设计要求。

5 一闸室待闸条件下船闸通过能力分析

三峡船闸通过能力直接表现为闸次数和每闸次货运量的乘积。而日均闸次数又取决于闸次间隔时间。闸次间隔时间就是指相邻两闸次船舶进入同一闸室的间隔时间,其长短直接决定了船闸每天所能通过的闸次数。

对一闸室待闸的调度方式进行了现场演练,研究了不待闸、一闸室部分待闸和一闸室满闸室待闸三种运行方式,结果满闸室待闸方式最优。一闸室满闸室待闸时,将当前闸次计划船舶一次性由靠船墩调入一闸室,后续闸次船舶调至靠船墩。试验选择以下三种待闸时机:

1) 一闸室待闸船舶向二闸室移泊完毕,二闸首人字门关闭到位后,靠船墩待闸船舶进入一闸室待闸;

2) 一闸室待闸船舶向二闸室移泊启动 10 min 后,靠船墩待闸船舶进一闸室待闸;

3) 一闸室待闸船舶向二闸室移泊时,靠船墩待闸船舶同时向一闸室移泊待闸。

设二闸室向三闸室充水时间为 t_1 , 3 闸首人字门开启时间为 t_2 , 二闸室船舶向三闸室移泊时间为 t_3 , 靠船墩船舶进入一闸室待闸系缆完成时间为 t_4 , 当 $t \leq t_1 + t_2 + t_3$ 时,上述三种待闸方式取得的效果相同。从目前运行情况看, t_1 一般为 12 min, t_2 为 4 min, t_3 为 15 ~ 25 min, 三项之和约 31 ~ 41 min, 如果在这一时间内靠船墩船舶不能全部进入一闸室待闸系缆完毕,即 $t \geq t_1 + t_2 + t_3$, 势必影响 3 闸首人字门

经比较,最终采用阀门间歇开启方式,尽管流态大体与前两种开启方式相同,但强度大大减弱,提高了船舶在一闸室满闸室待闸的安全性,且输水时间较短。实船试验测试成果汇总于表 3。

关闭时机,也就是延长了 t_3 , 增加了闸次间隔时间,影响一闸室待闸效率。第三种待闸方式增加了一闸室向二闸室移泊时间 15 ~ 5 min, 可以确保靠船墩待闸船舶进入一闸室待闸系缆完毕而不影响 3 闸首人字门关闭时机,是最优的调度方式。

显然,在上述最优的调度方式下,一闸室待闸情况下的闸次间隔时间为 $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7$, t_4 为三闸首人字门关闭时间,约 4 min, t_5 为二闸首充水时间,约 16 min, t_6 为一闸室向二闸室移泊时间,约 15 ~ 25 min, t_7 为二闸首人字门关闭时间,约 4 min, 计算的 $T = 74 \sim 94 \text{ min}$ 。一般情况下,移泊时间约 20 min, 则一闸室待闸条件下的闸次间隔时间为 84 min。

经过对 2006 年三峡船闸运行数据的统计分析,三峡船闸四级下行运行情况下,船舶未实行一闸室待闸时平均闸次间隔时间为 109 min 50 s, 10 月份实行一闸室船舶待闸后,当月的平均闸次间隔时间为 88 min 32 s, 11 月份的平均闸次间隔时间为 87 min 31 s, 实行一闸室船舶待闸后,闸次间隔时间能有效缩短约 20 min。

统计数据同时显示,三峡船闸实行船舶一闸室满闸室待闸后,完建期三峡单线船闸可提高每日下行闸次约 2.8 个,可见一闸室待闸效益显著。

6 结语

通过对三峡工程不同蓄水位 (144.0 ~ 156.0 m)、一闸首叠梁门放入高度、一闸室水深增加及二闸首船闸工作水头的提高等综合因素影响下船舶在一闸室待闸水流条件的研究,提出的不同水位下二闸首分别采取阀门局部开启和间歇开启的运行方式方案,能实现船舶在一闸室满闸室安全待闸。

三峡船闸完建工程实施以来,通过采取 156 m 水位下船闸四级运行和一闸室待闸措施,在每天换向一次运行的情况下,船闸保持了较高的通航效率,自 2006 年 9 月 15 日至 12 月 31 日共 108 天时间里,三峡北线船闸共运行 1 605 闸次、通过船舶 11 029 艘

次,旅客 2.3 万人次,实载货运量 $1\ 087 \times 10^4$ t,日均货运量 10×10^4 t,其中下行 6.2×10^4 t。日均货运量 10×10^4 t 较 2005 年双线船闸的日均 9×10^4 t 仍提高了 11%。

The Research on Improving the Ability to Pass Over the Three Gorges Shiplock by Optimizing Hydraulic Character

Cao Guangrong¹, Hu Ya'an², Gao Xiong³

(1. Economics and Management School of Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. The Administrative Bureau of Changjiang Three Gorges Navigation, Yichang, Hubei 443002, China)

[**Abstract**] This paper discusses the fluctuating character of the water in Chamber 1 when No. 2 chamber head is operating as the first one under the four – steps shiplock operating mode, expatiates the forming principle of the fluctuation, analyzes the impact on the water fluctuation in Chamber 1 when No. 2 chamber head is operating as the first chamber head, puts forward the valve opening pattern satisfying the safety demand when Chamber 1 is waiting, and tests the berthing condition of the ships in Chamber 1 by the experiment with real ships. The facts show that during the course of the Three – Gorges shiplock being fulfilled under the four – steps shiplock operating mode, the ways transferring the ships downriver from near frustra to chamber 1 can increase passing ability of about three ships per day, producing huge navigation benefit.

[**Key words**] Three Gorges shiplock; operating mode; water condition; passing ability

(cont. from p. 74)

and estimate the safety reliability of mechanical system. Based on the time-to-failure density function of parts, the mechanical system reliability model is constructed to track the change course of age structure of part population for the mechanical systems that are reassembled and maintained. By means of simulation of the system reliability model, concerned parameters with mechanical systems service life are defined. The paper discusses how the time-to-failure density function have influence on the service life for mechanical systems undergoing reassembly and maintenance. It is significant for estimating reliability and failure rate of systems and establishing reasonable maintenance policies.

[**Key words**] reassembly and maintenance; reliability prediction; age distribution; failure rate