

三峡船闸完建期 156 m 蓄水位 4 级运行方式原型调试研究

胡亚安, 张瑞凯, 李 云

(南京水利科学研究院, 南京 210029)

[摘要] 从水力学条件论证了船闸采用4级运行方案的可行性。通过原型调试,采取中间及闸首优化后的输水方式运行,基本消除了闸室第一分流口空化,船闸在超过设计的45.2 m水头下工作条件较好,在三峡船闸完建期156 m蓄水位船闸采用4级运行方式具优越性。

[关键词] 三峡船闸;运行方式;原型调试

[中图分类号] U641 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)09-0047-07

1 三峡船闸完建期 156 m 水位 4 级运行方式

三峡船闸采用双线连续5级布置,其总水头113.0 m,上游最高通航水位175.0 m,最低通航水位135.0 m(后期145.0 m);下游最高通航水位73.8 m,最低通航水位62.0 m;上下游水位变幅大,船闸运行方式复杂。

根据初步设计和技术设计审定的船闸水级划分方式,若库水位低于145.0 m时,只使用后面4级船闸,中间级船闸输水最大工作水头为41.5 m;库水位在145.0~152.4 m时,仍采用后4级船闸,中间级船闸输水的最大工作水头为45.2 m;库水位超过152.4 m时,按照船闸输水的最大工作水头为45.2 m的要求,船闸需采用5级运行,第1闸首将投入工作。

为了适应工程不同运行水位的要求,第1级船闸上下闸首的底槛和闸门采用了分两次建设的方案。第1闸首和第2闸首底槛高程均为131.0 m,第1闸首人字闸门按后期要求进行安装,但先期不装启闭机,也不投入运行;第2闸首人字闸门及机电设备按135.0~156.0 m通航水位安装。在三峡工程运行水位抬高至后期运行水位145.0~175.0 m

时,逐线对第1,2闸首进行完建,将船闸两个闸首人字闸门底槛由高程131.0 m加高至139.0 m,将第1闸首人字闸门的机电设备安装到位,同时第2闸首人字闸门及其启闭机通过重新安装,相应地抬高8 m。

2006年汛期结束后三峡工程水位由139.0 m将逐渐蓄至156.0 m,双线船闸亦分别进入完建期。在船闸完建前,第1闸首的闸门尚不能投入运行的情况下,需利用其事故检修门作为工作门参加工作,形成船闸5级运行的条件,使中间级船闸输水最大工作水头不超过45.2 m。但这种运行方式,在规定的设计水头以内,维持船闸运行的同时,事故检修门开启和关闭一个周期耗时达40~50 min,远大于人字门启闭需要的时间,这种运行方式下预计日均过闸闸次约8次,比蓄水前的13闸次/日明显减少,船闸通过能力降低,尤其船闸在完建期间为单线通航,将给航运带来较大压力。为此,有关方面提出了在156.0 m水位船闸仍采用后4级运行方式的设想,4级运行的优点在于:

1) 1闸室将作为引航道的一部分,第2闸首当首级使用,第1闸首人字门和阀门不参加运行,避免了5级运行方案要使用上游事故检修闸门挡水的不利因素,从而可缩短闸次间隔时间(缩短约30 min),

[收稿日期] 2008-01-02;修回日期 2009-05-20

[作者简介] 胡亚安(1965-),男,湖北云梦县人,南京水利科学研究院教授级高工,长期从事通航水力学研究;E-mail: xueshan_01@163.com

船闸通过能力将大大提高。

2) 由于1闸室水深增大,1闸室水流条件将比139.0 m运行水位得到较大改善,有利于船舶在1闸室待闸。在1闸室船舶待闸的条件下,可缩短船舶进闸距离约1 000 m、进闸时间20 min,船闸下行通过能力可进一步提高。

上游水位156.0 m情况下,船闸采用4级运行时,不同下游水位所对应的中间级及首末级闸首最大工作水头见表1。在下游水位62.0~65.6 m时,三峡船闸中间级和末级闸首最大工作水头将超过45.2 m和22.6 m的设计值。

表1 156 m蓄水位船闸4级运行工作水头

Table 1 Working water head of TGP lock with four-step operation under impounded level 156 m

上游水位/m	下游水位/m	中间级最大水头/m	首、末级最大水头/m
156	62	47.0	23.50
156	63	46.5	23.25
156	64	46.0	23.00
156	65	45.5	22.75
156	65.6	45.2	22.60

在下游最低水位62.0 m条件下,中间级闸首最大水头为47 m,超过设计值1.8 m;6闸首最大水头为23.5 m,超过设计值0.9 m。在超过设计水头下,船闸水力学及土建、金属结构能否满足要求是4级运行方案的关键,其中船闸水力学问题更为重要。为此,于2006年4~6月在船闸完建施工前进行了4级运行方式的水力学调试工作^[1]。

2 三峡船闸156 m水位4级运行方式原型调试研究方法

在156.0~62.0 m 4级运行最不利的水位组合下,船闸各闸首初始水位如表2。

表2 156.0~62.0 m 4级运行各闸室水位

Table 2 Water level of each chamber with four-step operation under water level 156.0~62.0 m

闸首	上闸室水位/m	下闸室(引航道)水位/m	初始水头/m	阀门处廊道初始淹没水深/m
2	156.0	132.5	23.5	34.25
3	156.0	109.0	47.0	31.50
4	132.5	85.5	47.0	28.75
5	109.0	62.0	47.0	26.00
6	85.5	62.0	23.5	10.50

由表可见,对于中间级闸首,最不利的工况出现

在5闸首,尽管3,4闸首工作水头也为47 m,但阀门后廊道初始淹没水深分别高于5闸首5.5 m和2.75 m,阀门工作条件相对要好。

根据多级船闸的特点,在三峡船闸139.0 m水位下,可以通过调整各闸室初始水位,使中间级闸首阀门工作水头达到47 m。

对于5闸首,由于下游引航道水位一般在约65.0 m,无法满足阀门处廊道初始淹没水深26 m的要求;而3闸首,要形成最不利的水位组合,要求2,3闸室初始水位分别为150.5 m,103.5 m,上游水位无法满足。因此只有选择4闸首才能达到最不利的水位组合,即调整3,4闸室初始水位分别为129.75 m和82.75 m,此时,阀门工作水头达到需要的47 m,而阀门处廊道初始淹没水深亦为最不利的26 m(对应的4闸室槛上起始水深为5.0 m)。

为此,选择4闸首,在139.0 m水位下模拟了156.0 m水位4级运行最不利的工况,通过现场设置的水听器、水位计、活塞杆窜振计、声级计、油压传感器等测量仪器,监测了不同水头下船闸输水水力特性、阀门段空化、阀门振动、阀门启闭机活塞杆窜动特性,经观测资料的综合分析,判断船闸在超设计水头下的工作状态。

3 双边阀门连续开启方式下船闸水力特性

经过有水调试确定的中间级闸首双边阀门正常开启方式为:双边阀门以 $t_v = 2$ min速率开启至全开位,在剩余水头6 m时以 $t_v = 3$ min速率动水关阀至 $t/t_v = 0.2$ 开度,水位齐平时开启人字门。这也是船闸试通航后一直采用的运行方式。在此运行方式下,进行了中间级闸首初始作用水头为47 m的船闸水力学条件研究。观测的输水系统流量、阀门段空化噪声、闸顶空气声压、活塞杆窜动量、门楣通气量及阀门启闭力等物理量过程线如图1所示。

对观测资料进行综合分析,并与有水调试成果对比,可以得出^[2]:

1) 在47 m水头下,输水系统最大流量由45.2 m水头的680 m³/s增大到700 m³/s,输水时间10.7 min;阀门开启过程中,门楣稳定通气,最大通气量达0.56 m³/s,有效地抑制了阀门底缘及顶缝空化,阀门运行平稳。

2) 中间级闸首初始工作水头由设计的45.2 m增大到47 m时,第一分流口空化、门井水流脉动、活塞杆窜动、启门力脉动和吊杆振动有所增强,但总体

来说,船闸运行正常。

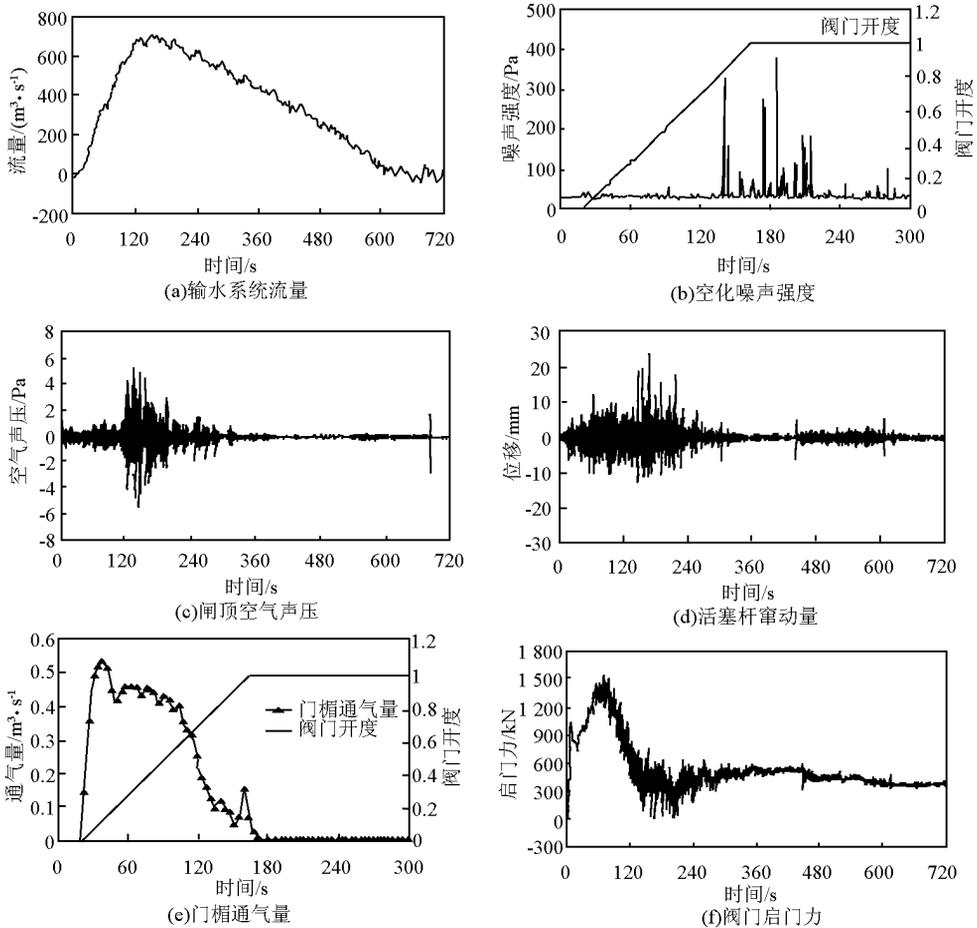


图1 47 m 水头下阀门连续开启方式各物理量变化曲线

Fig. 1 Curves of different physical quantities with double valves continuously opening under water head 47 m

3)47 m 工作水头下船闸水力学存在的主要问题是,在阀门开至 80 % 时,泄水闸室第一分流口开始形成空化(见图 2),空化持续时段约 3 min,以阀门全开后 22 s 空化最强;在闸顶能听到 10 余次轰鸣声,最大声级达 120 dB。第一分流口空化不仅将导致分流舌发生空蚀破坏,而且空化溃灭形成的冲

击波引起各门井水流压力波动、阀门液压启闭机活塞杆窜动、阀门门体振动及启门力脉动增大,在此种状态下长期运行可能引起阀门支铰螺栓松动及液压元件损坏,对液压启闭系统影响更大。需要研究合理的措施,解决闸室第一分流口空化问题,从而确保船闸及其设备的安全运行。

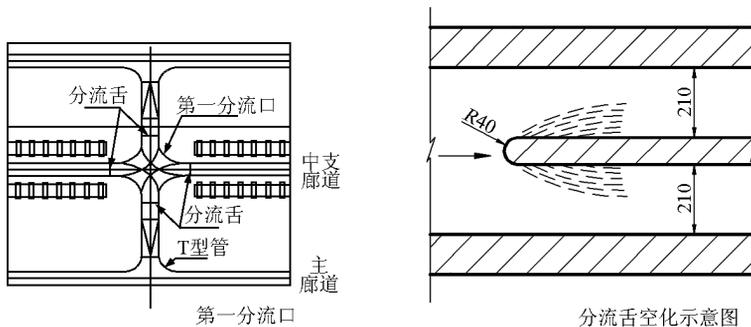


图2 三峡船闸第一分流口及分流舌空化示意图(单位:cm)

Fig. 2 Sketch map of the 1st - bifurcation and the cavitation phenomenon at the dividing tongue(unit:cm)

4 156 m 水位船闸 4 级运行方案中间级闸首运行方式优化研究

4.1 闸室第一分流口空化改善措施

空化数^[3]是衡量空化强弱的参数:

$$\sigma = \frac{[(P + P_a) - P_v]/\gamma}{v^2/2g}$$

$$\text{分流舌压力: } \frac{P}{\gamma} = Z_3 - \xi_1 \frac{v^2}{2g} - \frac{L_1}{g} \frac{dv}{dt}$$

式中, P 为参考压力, Pa; P_a 为大气压, Pa; P_v 为水的饱和蒸汽压, Pa; v 为参考断面流速, m/s; ξ_1 为上闸室到第一分流口的阻力系数; L_1 为上闸室到第一分流口的廊道惯性换算长度, m; Z_3 为 3 闸室水位, m; γ 为水的比重; $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ 。

空化的判别标准: $\sigma \geq \sigma_c$ 时无空化, σ_c 为临界空化数。减免分流舌空化不外乎两种途径:降低临界空化数或者增大工作空化数。

降低临界空化数只有通过工程措施实现,即采取措施改变分流舌体型,减弱水流分离现象。对于三峡船闸,共有 40 个分流舌,其改造的工程量较大,改造施工期对通航影响较大,且改造后的效果还有待观察。增大工作空化数的方法是降低分流舌过流流速。有水调试阶段成果指出,第一分流口发生空化的临界流量 $Q = 570\ \text{m}^3/\text{s}$,当 $Q \leq 650\ \text{m}^3/\text{s}$,分流口空化不致产生严重危害。

此次观测成果表明,在相同水头下,分流口空化变强,且持续时段变长,初步判断在经过 3 年运行后,由于分流舌存在不平整现象,空化较有水调试阶段容易发生,第一分流口发生空化的临界流量 $Q = 550\ \text{m}^3/\text{s}$,当 $Q \leq 640\ \text{m}^3/\text{s}$,分流口空化较弱。

降低输水系统流量最简便的方法是改变阀门运行方式,包括阀门的慢速开启和间歇开启。利用实测的流量系数,计算了阀门慢速开启时输水系统流量。结果表明,当采用 5 min 速率开启时,47 m 水头下输水系统最大流量可由 2 min 的 $700\ \text{m}^3/\text{s}$ 减小到 $610\ \text{m}^3/\text{s}$ 。虽然慢速开启可以达到降低输水系统最大流量的目的,但以往的研究成果表明,三峡船闸阀门采用慢速开启存在较大的不利因素。

三峡船闸目前采用 2 min 速率开启方式,此种快速开启可利用阀门开启过程中的惯性水头,大大提高门后水流压力及空化数;同时又不易形成慢速开启时贴附阀门而加强底缘空化的漩滚;即使发生

空化,同慢速开启相比,其空化强度将减弱,空化状态持续时间也相应缩短,造成空蚀的几率亦减小。在中间级闸首底扩廊道体型下,1:10 非恒定流减压模型^[4]成果表明,在阀门处廊道淹没水深 26 m 条件下,采用 2 min 开启,阀门底缘处于临界空化状态;若采用 5 min 开启,阀门底缘在 0.2~0.5 开度范围将发生空化,避免发生空化所需的淹没水深为 36 m。同时,慢速开启时门后漩滚较强,压力脉动增大,导致阀门振动及启门力脉动都大于快速开启方式。显然,尽管采用慢速开启可以减弱第一分流口空化,但对阀门工作条件不利,因此本次调试未对慢速开启方式进行研究。

间歇开启方式即阀门开至指定开度后停机,以控制输水系统流量,经过一定时段输水后,上下闸室水位差减小,再继续开启阀门至全开。间歇开启方式的关键在于确定合适的停机开度和停机时间。

停机开度的选择涉及到输水时间、停机期间阀门工作条件能否满足要求、停机期间分流口不发生空化或空化较弱等因素。在中小开度(小于 0.5)停机,输水系统流量小,分流口不会发生空化,但停机期间阀门后漩滚较强,该开度范围也是底缘和跌坎较易发生空化的开度,对阀门不利;此外为避免再次开启后输水系统流量过大,在此开度停机的时间必然较长,输水时间也相应延长。在大开度(大于 0.8)停机,阀门后流态较为平稳,但输水系统流量较大,分流口仍将发生空化。因此初步分析较适宜的停机开度为 0.5~0.7,此时可满足第一分流口不发生空化或空化较弱的要求。

在停机开度确定的前提下,停机时间的选择首先要考虑阀门再次开启后输水系统流量能否满足分流口不发生空化的要求;其次要考虑的是输水时间,应尽量缩短停机时间。通过对 0.5,0.6,0.65,0.7 等停机开度及不同停机时间的间歇开启方式下原型水力特性的观测研究,确定了较优的间歇开启方式,即停机开度 0.65、停机时间 3 min。

4.2 船闸水力特性及阀门工作条件

在推荐的间歇开启方式下,47 m 水头下船闸输水系统流量、阀门空化噪声强度、闸顶空气声压、门楣通气量及阀门启闭力等过程线见图 3。表 3 给出了不同作用水头双边阀门连续开启方式与间歇开启方式各物理量特征值对比。

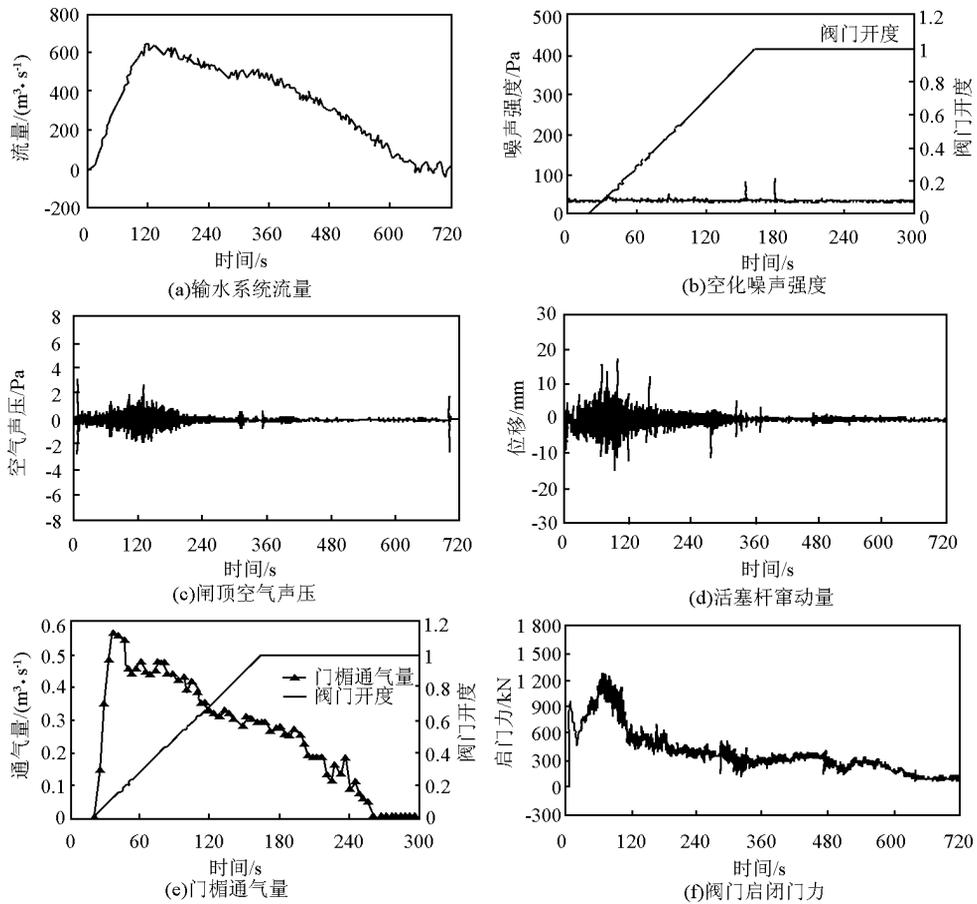


图3 47 m 水头下阀门间歇开启方式各物理量变化曲线
 Fig. 3 Curves of different physical quantities with double valves intermittently opening under water head 47 m

表3 水动力特征值对比

Table 3 Comparison of dynamic hydraulic characteristics

工况	最大流量 /m³·s⁻¹	输水 时间/s	分流口空化强度 均方根值/Pa		活塞杆窜动量		门井水位 降落幅 度/m	启门力/kN		吊杆纵向 振动均方 根值/g
			水听器 1	水听器 2	超过 10 mm 次数	均方 根值/mm		最大脉 动幅值	均方 根值	
40 连续开启	640	600	4.41	7.94	7	1.19	31.8	335.4	40.68	0.026
40 间歇开启	520	641	1.90	3.51	3	0.74	25.6	202.7	21.38	0.024
45 连续开启	680	614	8.64	13.95	25	1.82	36.2	410.1	46.09	0.041
45 间歇开启	640	660	5.21	5.95	12	0.96	30.2	336.9	24.07	0.026
47 连续开启	700	640	21.98	17.57	28	2.02	37.4	575.6	55.17	0.044
47 间歇开启	640	648	2.35	5.43	12	1.15	30.1	298.9	27.70	0.031

注:水听器 1 安装于北 4 闸首上游的北 3 下游检修门井;水听器 2 安装于北 4 闸首下游检修门井

观测结果表明:

1) 工作水头为 47 m 时,间歇开启方式最大流量发生在阀门开至 65% 开度停机瞬时,其值由连续开启时的 700 m³/s 减小到 640 m³/s;流量超过 600 m³/s 的时间也由连续开启时的 160 s 缩短到

70 s。间歇开启方式起到了控制流量的作用。各种水头下,采用间歇开启方式运行,输水时间略有延长,但均可控制在 11 min 以内,仍小于设计的 12 min,输水时间满足要求。

2) 由于三峡船闸的输水系统性能优良,初始波

浪力较小,船舶停泊条件由最大流量期间的水流流态决定。阀门采用间歇开启方式运行后,因输水系统最大流量减小,整个输水过程,闸室水面流态都很平稳。在47 m水头下,闸室最大流量小于139 m³/s水位运行工况。因此,采用间歇开启方式后,47 m水头下船舶停泊条件能满足要求。由于间歇开启并未改变闭门方式,闸室超灌泄亦满足设计要求。

3)空化噪声及闸顶空气声级监测结果表明,采用间歇开启运行方式,基本消除了各种水头下的闸室第一分流口空化,47 m水头下,在阀门开至65%开度停机后,北3下游检修门井水听器仅监测到几次量级较小的噪声,再次开启至全开过程,未监测到空化噪声,表明分流口空化已得到充分抑制。各种水头下在闸顶未听到异常响声,与连续开启相比,声级大大减小;即使在47 m水头下,监测的空气声压无脉冲波形,最大声级约100 dB。

4)采用间歇开启方式后,由于引起活塞杆窜动的根源——第一分流口空化得到充分抑制,避免了空化溃灭冲击波对门体的冲击,与连续开启相比,活塞杆窜动量显著减小,液压启闭系统运行平稳,实测的启门力脉动比连续开启方式明显减小。47 m水头下,连续开启时启门力脉动幅值达575 kN,均方根值为55.17 kN;采用间歇开启后,最大脉动幅值减小到350 kN,均方根值降为27.70 kN。

综合各物理量变化资料,采用间歇开启方式运行后,阀门启闭过程及间歇停机过程中,启闭系统运行平稳,工作正常,闸顶无异常声响。因第一分流口空化基本消除,同时,停机期间阀门段底缘空化得到抑制,整个阀门开启及停机过程,活塞杆窜动量、各门井水流压力脉动、启门力脉动、阀门振动都较小,阀门工作条件较好。

因此,三峡工程156 m蓄水位下船闸采用4运行方式,中间级闸首在最大工作水头47 m条件下,采用推荐的间歇开启方式,双边阀门运行工况,船闸水力学条件可以满足要求,且比139 m水位船闸现行工作条件^[5]还要优越,而输水时间也在设计的12 min内。对于40~46 m工作水头,采用相同的间

歇开启方式,双边阀门运行工况,船闸水力学条件亦优于双边连续开启工况。

5 结语

1)在三峡船闸完建期上游水位蓄高至156 m时,与5运行方案相比,船闸采用4级运行方案,既可避免利用上游事故门挡水,缩短设备运行时间;又可将船舶待闸位置由上游靠船墩移至1闸室,节省船舶进闸时间,从而可显著提高船闸通过能力。

2)提出采用双边阀门间歇开启方式控制输水系统流量不超过640 m³/s,以减弱及消除第一分流口空化。经优化研究,推荐采用停机开度为0.65、停机时间3 min的方案。

3)采用推荐的运行方式后,47 m水头下输水系统最大流量640 m³/s,输水时间645 s,闸室流态平稳,输水系统水力学条件较优。阀门在开启及停机过程,运行平稳,闸顶无异常声响。与连续开启方式相比,活塞杆窜动量、各门井水流压力脉动、启门力脉动、阀门振动都较小,阀门工作条件较好。在156 m蓄水位,船闸采用后4运行是可行的。

4)对于40~46 m工作水头,采用相同的间歇开启方式,双边阀门运行工况,船闸水力学条件远优于双边连续开启工况。推荐的中间级闸首阀门运行方式不仅在船闸完建期使用,而且适用于船闸各个运行期。

参考文献

- [1] 胡亚安,张瑞凯,李 云,等.三峡枢纽156 m水位四级运行方式原型调试研究[R].南京:南京水利科学研究院,2006
- [2] 张瑞凯,胡亚安,李 云,等.三峡永久船闸原型调试中间级闸首水动力学特性[J].水利水运工程学报,2005
- [3] 中华人民共和国交通部.船闸输水系统设计规范(JTJ306—2001)[S].北京:人民交通出版社,2001
- [4] 胡亚安,张瑞凯.三峡船闸阀门底扩与顶扩廊道水力特性综合研究[J].水科学进展,1998
- [5] 张瑞凯,胡亚安,李 云,等.优化输水方式提高围堰发电期三峡船闸通过能力的措施研究[R].南京:南京水利科学研究院,2004

Study on four-step operational mode prototype debugging of TGP lock under impounded level 156 m in the finishing construction period

Hu Ya'an, Zhang Ruikai, Li Yun
(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

[**Abstract**] This paper expounds the superiority of adopting four-step operational mode for TGP lock under impounded level 156 m in the finishing construction period, and demonstrates the feasibility of adopting four-step operational mode with the hydraulic conditions. After adopting the optimizing water conveyance pattern by means of prototype debug, the cavitation of the 1st-bifurcation at mid chamber has been basically eliminated, the working conditions of the lock under exceeding design water head 45.2 m has been confirmed well, therefore, the four-step operational mode can be adopted for TGP lock.

[**Key words**] TGP lock; operational mode; prototype debugging

(上接 51 页)

Pulsed holography diagnosis of high-speed particles

Cao Na, Cao Liang, Xu Qing, Cui Guangbin, Ma Jiming,
Zhang Zhanhong, Du Jiye, Dong Jingran
(*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

[**Abstract**] Based on the theory of particle field holography, a set of corresponding pulsed holographic diagnostic system was developed, on which series of experiments were carried out. In this paper, the measuring principle of ejected particles shocked by explosive is analyzed simply, the assemblies of the diagnostic system and their functions are described, and the experiment results obtained with the system are showed. The results show that the system can realize the three-dimensional diagnosis of high-speed particles and meet the requirements of actual needs. Meanwhile, the developing direction of the application and the limitation of the system are pointed out.

[**Key words**] pulsed holography; particle field; diagnosis system; high-speed movement