

提高三峡船闸完建期通过能力措施研究

胡亚安^{1,2,3}, 张瑞凯^{1,2,3}, 李 云^{1,2,3}, 宗慕伟^{1,2}, 李 君^{1,2,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 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:为缓解三峡船闸完建期单线运行带来的航运压力,提出了156.0 m水位船闸由五级运行改为后四级运行以及船舶待闸位置由上游靠船墩移至一闸室的创新设想。借助理论分析、原型调试及实船试验等手段,通过优化各闸首输水方式,解决了船闸四级方案超设计水头运行及一闸室待闸船舶安全的关键技术难题,阐明了一闸室水体波动特性及其与待闸船舶系缆力间的相互关系,提出了符合一闸室待闸特点的运行调度方案。船闸实际运行表明,上述措施大大提高了完建期三峡船闸的通过能力,取得了显著的经济和社会效益。

关 键 词: 三峡船闸; 完建期; 通过能力; 原型调试

中图分类号: U641.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0105-11

三峡船闸总水头113.0 m,采用双线连续五级布置,上游最高通航水位为175.0 m,最低通航水位为135.0 m(后期为145.0 m);下游最高通航水位为73.8 m,最低通航水位为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,库水位在135.0~152.4 m时,船闸采用后四级运行,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,需采用五级运行,1闸首将投入工作。

为了适应工程不同运行水位的要求,第一级船闸上、下闸首的底槛和闸门采用了分两次建设的方案。初期建设时1闸首和2闸首底槛高程均为131.0 m,1闸首人字闸门按后期要求进行安装,但先不装启闭机,也不投入运行;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,1闸首人字闸门的机电设备安装到位,同时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。

根据三峡船闸1,2闸首完建方案,每线船闸完建可能需要的时间为135~180 d,总工期约为270~360 d。因此,在这段时间内,只有一线船闸维持船舶的过坝运输,船闸的运行采用船舶单向成批过闸、定时进行换向的方式。

2006年汛期结束后,三峡工程水位将由139.0 m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,1闸首人字闸门尚不能投入运行,需利用其事故检修门作为工作门参加工作,形成船闸五级运行的条件,以使中间级船闸输水最大工作水头不超过45.2 m。但作为一种临时措施,此种运行方式在规定的设计水头以内,事故检修门操作一次需耗时40~50 min(含提升、下放和横移时间),较原设计的1闸首人字闸门开关门时间(12 min)延长约30 min,从而将大大增加船闸的闸次间隔时间,直接影响船闸的通过能力,而且完建期间船闸为单线通航,因而导致三峡工程的航运压力剧增。

收稿日期: 2009-10-20

作者简介: 胡亚安(1965-),男,湖北云梦人,教授级高级工程师,主要从事通航水力学研究。E-mail: yahu@nhri.cn

1 提高三峡船闸完建期通过能力的措施及关键技术

三峡船闸通过能力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,直接决定了船闸每天所能通过的闸次数.

鉴于完建期船闸五级运行采用事故检修门挡水将显著降低船闸通过能力的情况,提出在上游蓄水位 152.4 ~ 156.0 m 期间船闸仍维持后四级运行的方案,同时在后四级运行的前提下,改变船舶的待闸方式,从而达到提高完建期船闸通过能力的目的.

1.1 156.0 m 蓄水位船闸采用后四级运行方式的关键问题

156.0 m 水位船闸采用后四级运行的优点在于:一闸室将作为上游引航道的一部分,2 闸首作为首级使用,1 闸首人字闸门和阀门不参加运行,避免了五级运行方案要使用上游事故检修门挡水的不利因素,可缩短闸次间隔时间约 30 min,从而将大大提高船闸通过能力.

上游水位 156.0 m 情况下,船闸如采用四级运行,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. 在下游最低水位 62.0 m 条件下,中间级闸首最大水头为 47.0 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四级运行方案的关键,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四级运行方式的水力学调试工作^[1,2].

1.2 船闸四级运行方式下一闸室待闸的关键技术

三峡船闸四级运行方式一闸室待闸过闸流程见图 1. 可见,在设备运行时间和输水时间以及移泊时间相对稳定的前提下,闸次间隔时间取决于船舶进闸时间.

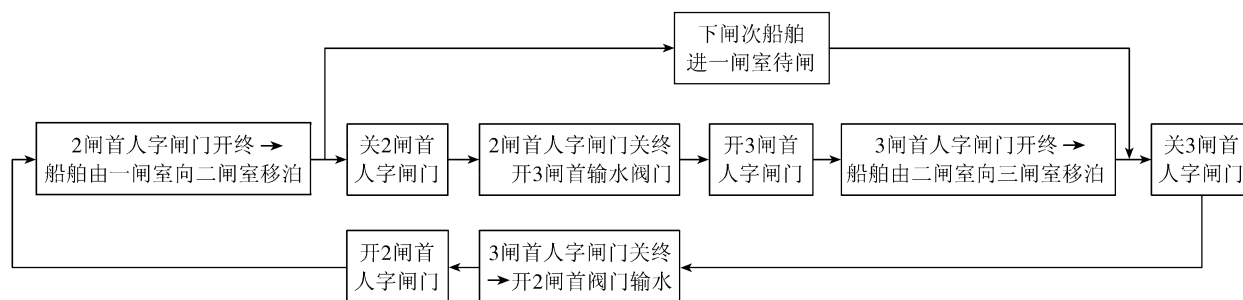


图 1 三峡船闸四级运行方式一闸室待闸过闸流程

Fig. 1 Passing procedure of resells in the 1st chamber under the four-step operation mode for the TGP lock

三峡工程设计文件及规范规定,船舶待闸位置应位于上游引航道靠船墩. 当船闸四级运行时,船舶自上游靠船墩移至二闸室的距离约 1 200 m,平均进闸时间在 30 ~ 50 min,比各闸之间的移泊时间增加 20 ~ 30 min.

在四级运行方式下,一闸室成为船舶进入二闸室的一部分航道,如果船舶能在一闸室待闸(见图 2),则理论上船舶进闸时间就是船舶从一闸室到二闸室的移泊时间,可节省船舶从上游靠船墩到一闸室的进闸时间约 30 min,从而可缩短闸次间隔时间,提高过闸次数,达到提高船闸通过能力的目的.

影响下行船舶在一闸室待闸的原因主要为二闸室充水水量及三闸室充水时的补水水量有一部分取自狭窄、水浅且

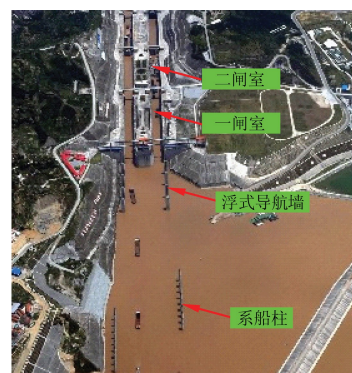


图 2 船舶待闸位置示意图

Fig. 2 Waiting location for vessels

一端封闭的一闸室空间,导致一闸室水体波动和1闸首口门及上半闸室纵向流速较大,停泊条件不能满足规范要求。此外,由于待闸位置的改变,船舶高度运行方式将发生较大变化。因此船闸在一闸室待闸的关键技术是寻求满足一闸室停泊条件的输水方式,以及制定安全合理的一闸室待闸运行调度规程。

2 156.0 m 蓄水位三峡船闸采用后四级运行方式关键技术研究

2.1 中间级闸首超设计水头下的船闸运行特性研究

根据多级船闸的特点,在三峡船闸139.0 m运行水位下,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47.0 m,利用现场设置的水听器、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、阀门段空化特性、阀门振动特性及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。

2.1.1 双边阀门连续开启方式下船闸水力特性 经过船闸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闸门,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,进行了中间级闸首不同初始作用水头下船闸水力学条件研究。初始作用水头为47.0 m时输水流量、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见图3。

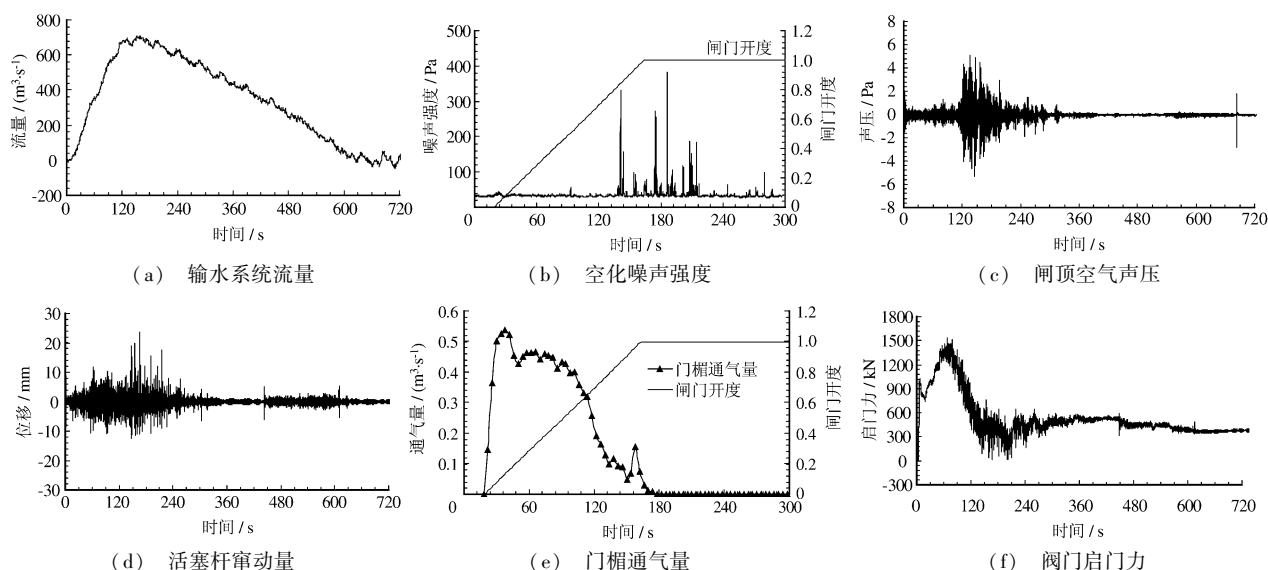


图3 47.0 m水头下双边阀门连续开启方式各物理量变化曲线

Fig. 3 Curves of different physical quantities with double valves continuously opening under water head 47.0 m

通过对观测资料的综合分析,并比较有水调试阶段45.2 m水头观测成果^[3]可见:①在47.0 m水头下,输水系统最大流量由45.2 m水头的 $680 \text{ m}^3/\text{s}$ 增大到 $700 \text{ m}^3/\text{s}$,输水时间为10.7 min;在阀门开启过程,门楣稳定通气,最大通气量达 $0.56 \text{ m}^3/\text{s}$,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47.0 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;③47.0 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4),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。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,特别是水头由设计的45.2 m增大到47.0 m时,各物理量显著增大(见图5),在此种状态下长期运行可能引起阀门支

较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.

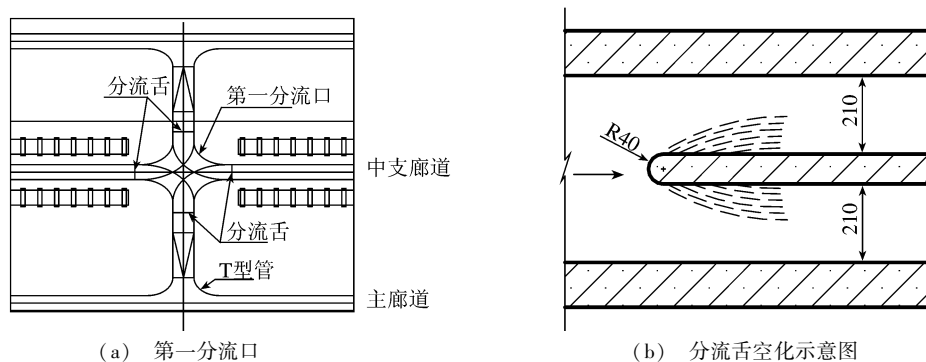


图 4 三峡船闸第一分流口及分流舌空化示意图

Fig. 4 Sketch of the 1st bifurcation and the cavitation phenomenon at the dividing tongue

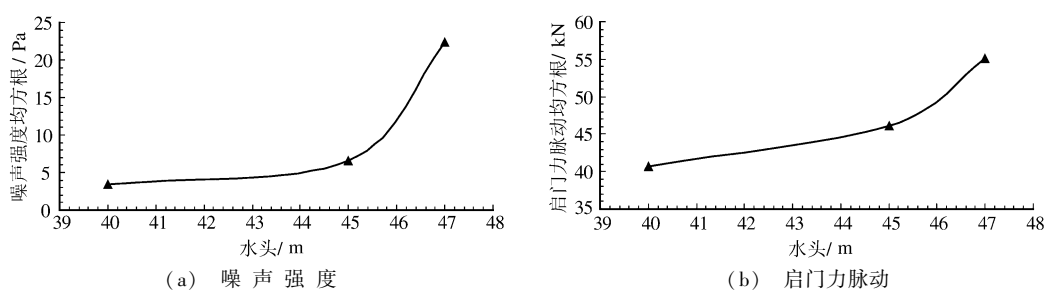


图 5 各特征值与水头的关系

Fig. 5 Relationship between each characteristic value and water head

2.1.2 中间级闸首运行方式优化研究 中间级闸首运行方式优化的目的是改善闸室第一分流口的空化现象.空化数^[4]是衡量空化强弱的参数,空化的判别标准为: $\sigma \geq \sigma_c$ 时无空化,其中 σ_c 为临界空化数.减免分流舌空化不外乎两种途径,即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则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 $Q \leq 650 \text{ m}^3/\text{s}$,分流口空化不致于产生严重危害.本次观测成果表明,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.降低输水系统流量的最简便的方法是改变阀门运行方式,包括阀门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 $t_v = 5 \text{ min}$ 速率开启时,47.0 m 水头下输水系统最大流量可由 $t_v = 2 \text{ min}$ 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.三峡船闸目前所采用的 2 min 这一较快的速率开启方式的原因是: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涡,即使发生空化,同慢速开启相比,其空化强度也将减弱,空化状态持续时间也相应缩短,造成空蚀的机率亦减小.在中间级闸首底扩廊道体型下,1:10 非恒定流减压模型^[5]成果表明,在阀门处廊道淹没水深 26.0 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,因此调试中未对慢速开启方式进行研究。

间歇开启方式就是将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、分流口是否发生空化或空化强弱等因素。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的是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,即停机开度为 0.65,停机时间 3 min。

不同作用水头下,原连续开启方式与优化后的阀门间歇开启方式各物理量特征值比较见表 1。

表 1 水动力特征值比较

Tab. 1 Comparison of hydro dynamic characteristics

水头 / m	开启方式	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
				水听器 1	水听器 2	超过 10mm 次 数/次	均方 根值 / mm		最大脉动 幅值	均方 根值	纵向振动
											均方根值 /g
40.0	连续开启	640	600	3.47	6.17	7	1.19	31.8	335.4	40.68	0.026
	间歇开启	520	641	1.90	3.51	3	0.74	25.6	202.7	21.38	0.024
45.2	连续开启	680	614	6.63	10.63	25	1.82	36.2	410.1	46.09	0.041
	间歇开启	640	660	5.21	5.95	12	0.96	30.2	336.9	24.07	0.026
47.0	连续开启	700	640	22.38	17.89	28	2.02	37.4	575.6	55.17	0.044
	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 47.0 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 $700 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小到 $640 \text{ m}^3/\text{s}$;流量超过 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 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,船舶停泊条件决定于最大流量期间的水流流态。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 47.0 m 水头下,闸室最大流量小于 139.0 m 水位连续开启方式运行工况,因此采用间歇开启方式后船舶停泊条件能够满足要求。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,47.0 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;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。47.0 m 水头下,连续开启时启门力脉动幅值达 575.6 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 298.9 kN,均方根值降到 27.70 kN.

综合各物理量实测资料可知,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中,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 156.0 m 蓄水位下船闸采用四级运行方式,中间级闸首在最大工作水头 47.0 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 139.0 m 水位船闸现行工作条件^[6]还要优越,而输水时间也在设计的 12 min 内.对于 40.0 ~ 46.0 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.

2.2 6 闸首超设计水头下的船闸运行特性检验

通过调整水位在 6 闸首形成四级运行时的最大工作水头 23.5 m,超过设计水头 0.9 m,调试成果表明:

(1)在相应的下游水位 64.79 m 条件下,双边正常泄水工况,阀门运行平稳,无异常声响.开门之初惯性力峰值超过下游水位 5.5 m,小于结构设计 9 m 的允许值;阀门井最低水位 62.40 m,全开后门井漩滚较强;下游检修门井最低水位 55.50 m,仍有 4.0 m 水柱的正压;阀门开启过程门楣稳定通气,充分抑制了阀门段廊道空化,全开后五闸室第一分流口有延续 2 min 的空化噪声,但强度不大.总体表明,输水系统及阀门工作条件满足设计要求.当下游水位为理论上的 62.00 m 时,在 23.5 m 最大工作水头下,阀门全开后门顶最小淹没水深仅 3 m 左右,门井水面漩滚较强,可能发生表面掺气现象,实际运行时应注意观察阀门及启闭机运行情况,必要时调整阀门运行方式.同时,为解决超泄问题而采取的提前关阀不会导致门后脱空现象,估计还有 1.2 m 水柱的正压;

(2)6 闸首由于超长泄水箱涵特殊水力学问题的存在而对动水关阀范围进行了限制,试验中探讨了运行规程所允许的在 5 闸首人字闸门合拢位丢失情况下,6 闸首动水关阀工况的阀门工作条件.动水关阀过程,阀门及杆件无异常振动,门楣通气能较好地适应紧急关阀工况,在关阀过程中,门楣通气量显著增加,较好地抑制了因门后压力降低而变强的阀门底缘空化.该紧急工况船闸输水系统及阀门水力学条件满足设计要求.在下游水位 64.82 m 条件下,阀门开至 $n=0.3$ 开度紧急动水关阀,下游检修门井没有脱空,仍有 2.5 m 水柱的正压.当下游水位为最低的 62.00 m 时,预计检修门井出现负压并有少量脱空带气现象,需注意检修门井顶盖板安全.

2.3 船闸土建及金属结构

在 156.0 ~ 62.0 m 水位组合下,船闸采用四级运行方式,经设计复核,各闸室水位均在相应闸室后期最高、最低水位之间,内水压力并未超出船闸结构设计条件,外水荷载及船舶荷载等未发生变化,因此闸首及闸墙结构的受力状态也不会超过原设计条件.2 ~ 6 闸首人字闸门的挡水水头和运行淹没水深均未超过相应的设计值,各闸首人字闸门门体结构安全,启闭机可正常运行,人字闸门能正常使用.

通过中间级闸首输水方式优化、6 闸首超设计水头检验和土建、金属结构设计复核,三峡船闸在 156.0 m 水位下采用后四级的运行方案是可行的.

3 三峡船闸四级运行方式一闸室船舶待闸关键技术研究

3.1 船闸四级运行方式下一闸室波动特性分析

在船闸完建施工阶段开始前,对一闸室水位波动特性进行了研究,其上游水位为围堰发电期汛后水位 139.0 m,2 闸首阀门运行方式为:阀门采取以 $t_v=2$ min 的全开速率开至 60%、剩余水头 1 m 时动水关阀至 30% 的局部开启方式运行,输水时间 12.7 min.在此运行方式下,2 闸首人字门前水位波动过程线及 1 闸首口门区流速见图 6.可见,一闸室最大波幅达 0.98 m,1 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 1.5‰,按 5 000 t 船队,其纵向系缆力达到 7.5 kN,超过设计值,一闸室水流条件不能满足船

舶安全待闸的要求。

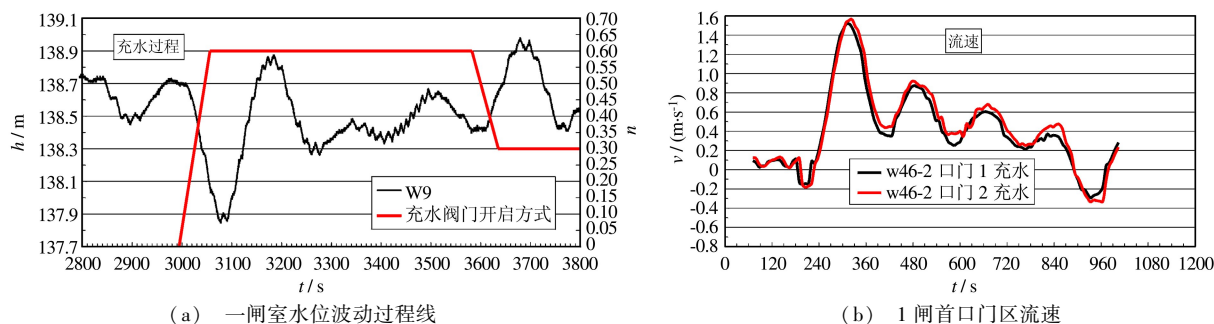


图6 原开启方式下一闸室水流特性(139.0 m 水位, $t_v=2$ min)

Fig. 6 Flow characteristics in the 1st chamber under primary operation mode (water level 139.0 m, $t_v=2$ min)

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,二闸室充水概化图见图7。

经分析,二闸室充水时,一闸室的水体波动主要由两类组成,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1闸首口门非恒定进水流量所产生,并在具有进(出)水孔段的一闸室推进的正向波。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。第一类波动其变化较大,是影响一闸室水体波高大小的主要因素,而第二类波动其幅值较小,但由于是推进波,因而是影响一闸室水面坡降的主要因素。

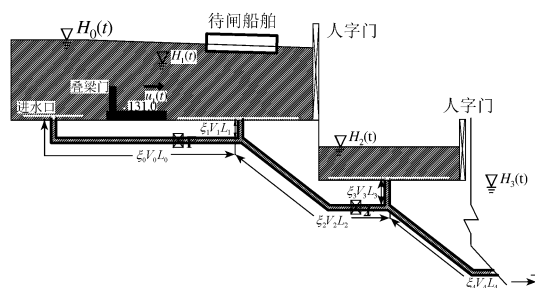


图7 二闸室充水概化图

Fig. 7 Filling course of the 2nd chamber

实测资料表明,自1闸首口门至2闸首,波幅沿程逐渐增大,而纵向流速沿程逐渐减小,至2闸首人字门,波幅最大,流速为零;1闸首口门流速最大,波幅最小,波动周期 $T=160$ s。

3.2 满足船舶一闸室待闸条件的措施研究

二闸室充水导致一闸室内水体波动较大的根源是部分水体取自一闸室,为此可采取工程措施和运行方式优化减小取自一闸室的水量,从而减小其水体波动,保障船舶在一闸室安全待闸。其中,工程措施指临时封堵一闸室输水系统出水口,可使二闸室充水及三闸室充水的补水均取自上游引航道进水口。采取此措施后可基本上消除一闸室内的水体波动。由于封堵一闸室96个出水孔涉及停航、工程投资等因素,未予采用。优化输水方式的关键在于寻找满足一闸室待闸条件的2闸首阀门开启方式;又要使输水时间不至延长过多,影响通过能力。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。为此,通过调整2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。

3.2.1 完建前输水方式优化研究 优化2闸首阀门开启方式以减小1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 $t_v=2$ 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,且较快的开启速率其惯性影响也更大,对水体的扰动作用也就较大,为此重点研究了开启速率的影响。

开启速率对一闸室水位最大波幅及1闸首口门区流速的影响见图8。最大波幅及纵向流速随开启速率的减慢而减

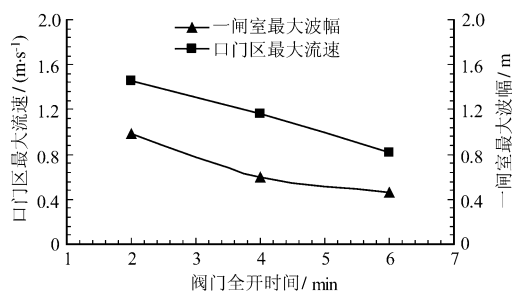


图8 开启速率对一闸室最大波幅和纵向流速的影响

Fig. 8 Influence of the opening rate on the maximum wave amplitude and longitudinal flow velocity in the 1st chamber

小. 与开启速率 $t_v=2$ min 相比, $t_v=6$ min 开启时一闸室最大波幅由 0.98 m 降至 0.46 m, 纵向水面平均坡降由 0.1% ~ 0.15% 降至 0.035% ~ 0.05%, 1 闸首口门区最大纵向流速由 1.46 m/s 降至 0.82 m/s. 在 139.0 m 水位下, 就 2 闸首阀门开启速率对一闸室水面波动的影响进行了研究. 在阀门以 $t_v=2$ min 或 6 min 速率都开至 60% 停机输水这一方式下, 波动的周期均为 160 s, 在阀门开启至闸室出现波谷的 $T/2$ 时段, 即 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, 在相同时刻放慢开启速率后的流量显著减小, 因此一闸室水位波动明显减小.

在相同的开启速率下, 各种停机开度对应的最大波高基本一致, 均发生在第一个波谷, 约 20% 开度, 这是因为这时从 1 闸首口门处补充的水量已经较多, 阻止了一闸室水位继续下降, 因此在阀门停机后, 尽管流量增大, 但波动特征也并不明显. 然而, 由于停机开度增大造成的流量增大, 将使口门区流速增大, 一闸室靠近口门区的局部流态如回流、漩涡等将增强. 此外, 由于停机开度加大, 为了克服闸室超灌的提前关阀的水头将相应增大, 由此引起的负波作用将增强, 从而形成的较大的波高, 可能超出阀门开启之初的第一波峰值. 因此, 阀门不仅不采用局部开启方式. 停机开度为 60%.

在开启速率由原 $t_v=2$ min 减慢到 $t_v=6$ min 后, 一闸室水力指标已具备船舶待闸条件, 且输水时间比原方式仅延长约 30 s, 对通过能力影响不大. 为此进行了实船试验, 实测了各种船型在一闸室待闸时的系缆力.

一闸室有待闸船舶情况下, 一闸室内水体波动的波速 $C = \sqrt{g \frac{(\omega_c - \chi)}{B_c}}$, 波高 $z = Q/CB_c$, 其中: B_c 为闸室宽度; ω_c 为闸室过水横断面面积; χ 为船舶浸水横断面面积. 与不待闸相比, 待闸后波速减小, 波高将增大. 此外, 在船首、船尾因过水横断面的突然变化又将产生复杂的波浪反射现象, 而且这种波浪的反射在船舶两端, 其性质正好相反. 因此, 还将增大一闸室的水体波动, 并影响到待闸船舶的系缆力变化, 船队尺寸越大, 其影响越为显著.

典型船舶系缆力过程线见图 9. 一闸室待闸船舶将受到由水面坡降产生的波浪力、由纵向水流流速所产生的流速力和由水流流速不均匀分布及局部水流所产生的局部力等 3 种水流作用力. 由于在一闸室船舶待闸范围最大纵向流速不超过 0.6 m/s, 且沿程减小, 流速分布均匀, 流态平稳, 流速力及局部力均可忽略, 船舶系缆力主要为波浪力, 因此其变化特性与一闸室水位波动特性完全相似. 在一闸室水位下降, 闸室水面呈正坡降时, 船舶受到向 2 闸首的作用力; 当水位处于波谷时, 闸室正水面坡降最大, 船首或船尾系缆力达最大值.

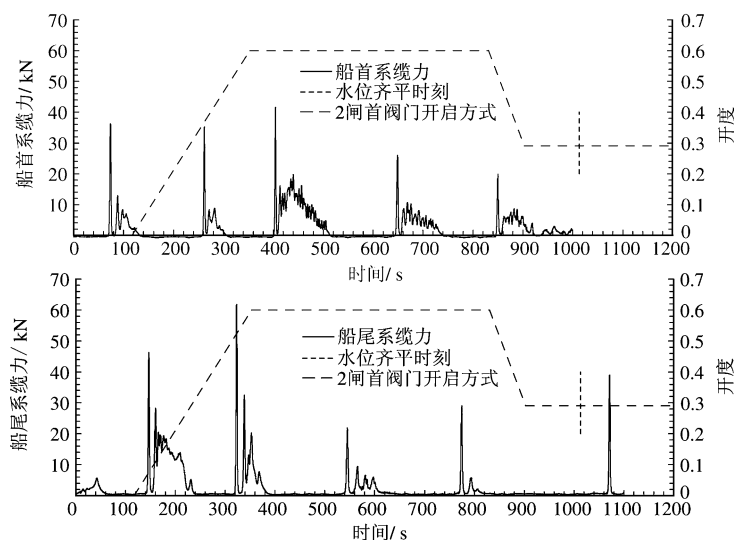


图 9 典型船舶系缆力过程线

Fig. 9 Curves of vessel's typical mooring force

在 139.0 m 水位下,大量实船试验结果表明,除特大型船舶外(7 000 t 船队),通过输水方式优化后的一闸室水流条件均能满足船舶待闸要求。

3.2.2 完建期蓄水阶段输水方式优化研究

(1) 蓄水位对一闸室波动的影响

2006 年 9 月 15 日,三峡工程开始蓄水,南线船闸停航进入完建阶段,北线船闸单向通航,至 11 月 10 日,三峡工程水位蓄至 155.3 m。

在 $t_v=6$ min 开启速率下,随上游水位的升高,也就是一闸室水深的增加,相应地一闸室波速增大,波动周期缩短,一闸室波幅和纵向比降也随之减小。一闸室最大波幅、最大纵向比降与一闸室水位关系见图 10。在 139.0 ~ 144.0 m 水位,一闸室水位波动相对较大,最大波幅可达 0.6 m,闸室纵向比降 1.0‰,当水位超过 145.0 m 时,一闸室波动特征仅在开门过程较为明显,最大波幅仅 0.10 ~ 0.15 m,闸室最大纵向比降基本不变,约为 0.15‰。

显然,随着蓄水位的上升,一闸室水流条件更有利于船舶安全待闸。为此,在水位蓄至 145.0 m 时,将阀门停机开度加大到 70%,以缩短输水时间。

(2) 叠梁门放置对一闸室波动的影响

三峡船闸完建前,1 闸首平台高程为 131.0 m,当平台水深大于 10.5 m 时,从保证船闸运行的安全出发,需放置叠梁门,每节叠梁门高度为 3.8 m。根据设计要求,1 闸首叠梁的放入高度应满足叠梁顶部水深大于 5.0 m,同时小于 10.5 m 的条件。

在水位蓄至 153.0 m 以上时,1 闸首口门需放置 4 节叠梁门。叠梁门放置后,减少了 1 闸首进水断面积,从而增强了纵向水流,并增大了叠梁门前后的水位差,形成了薄壁堰顶水流,还使 1 闸首口门处的波浪反射特性有所改变,从而影响了—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副导墙,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、漩流及涌泡等不良流态,同时在纵向水流到达静水的区域后受堰后水面降落影响还形成振荡的水面波纹。由此可见,1 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,三维特性较为明显。

为改善因叠梁门的放置引起的口门区水流流态恶化,对 2 闸首阀门开启方式进行了进一步的深化研究。比较了以下 3 种运行方式:①与 145.0 m 水位相同,阀门局部开启:以 $t_v=6$ min 的速度开至 70%;②局部开启,减小停机开度:以 $t_v=6$ min 的速度开至 60%;③间歇开启:以 $t_v=6$ min 的速度开至 50%,停 4 min 后以相同的速度继续开至 100%。试验结果见表 2。经比较,最终采用阀门间歇开启方式。间歇开启方式的流态与前两种局部开启方式总体上相似,但回流、漩涡、漩流及涌泡等不良流态显著改善,从而可提高船舶在一闸室满闸室待闸的安全性,且输水时间仅为 15.6 min。

表 2 155.0 m 水位 4 节叠梁门典型工况试验成果

Tab. 2 Test results of typical working conditions under water level 155.0m with four-stop log gates placed

阀门运行方式	最大波幅 / m	叠梁门最大流速 / (m · s ⁻¹)	最大坡降/ ‰	输水时间 / min	最大流量 / (m ³ · s ⁻¹)
1	0.08	1.08	0.193	15.7	450
2	0.10	0.96	0.119	17.7	390
3	0.13	0.86	0.122	15.6	360

确定间歇开启方式后,进行了完建期 156.0 m 蓄水位实船试验,试验结果见表 3。

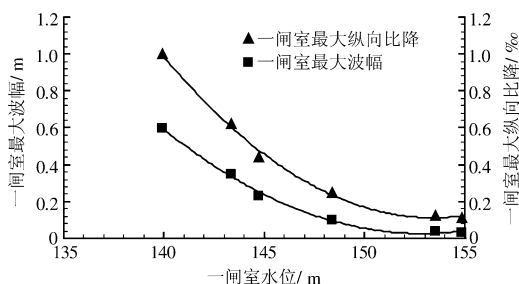


图 10 一闸室最大波幅、最大纵向比降与一闸室水位关系

Fig. 10 Relationship between water level and maximum wave amplitude & maximum longitudinal slope in the 1st chamber

表 3 155.0 m 水位 4 节叠梁门一闸室船舶待闸实船试验成果

Fig. 3 Results of the 1st chamber full-scale ship tests under water level 155.0 m with four-stop log gates placed

组次	水位 / m	水头 / m	船型	载 重 / t	停泊位置	最大波幅 / m	最大流速/(m·s ⁻¹)		最大系缆力/kN	
							断面 1	断面 2	船首	船尾
1	154.89	22.2	大船队	5 000	整个闸室	0.11	0.21 (5#柱)	0.46 (3#柱)	5.6	33.8
2	154.83	22.05	小单船	233	1#~2#系船柱	0.11	1.15 (1#柱)	0.75 (2#柱)	/	3.2
3	155.18	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	155.20	22.2	单船	1 500	1#~3#系船柱	0.10	0.8 (1#柱)	/	0.7	7.6

在上游 155.0 m 水位左右放置 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,但系缆力均满足要求.因此,采用阀门间歇开启方式可以达到既缩短输水时间,又具有较好水流条件可保证一闸室待闸船舶安全的目的,目前已应用于工程.

3.2.4 一闸室待闸调度方式 由于一闸室待闸与设计的靠船墩待闸方式有较大差异,对其调度工艺进行了深入研究.总结的调度原则为:连续调度船舶、静水进闸系缆、动水停泊待闸.具体调度方式为: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;二闸室船舶向三闸室移泊时,靠船墩待闸船舶同时向一闸室移泊待闸.这一调度方式的优点是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 闸首人字闸门关闭时机.

3.2.5 一闸室待闸通过能力分析与效果 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_1 为二闸室向三闸室充水时间,约 12 min; t_2 为 3 闸首人字门开启时间, $t_2=4$ min; t_3 为二闸室船舶向三闸室移泊时间,约 15~25 min; t_4 为 3 闸首人字门关闭时间, $t_4=4$ min; t_5 为 2 闸首充水时间,约 16 min; t_6 为一闸室向二闸室移泊时间,15~25 min; t_7 为 2 闸首人字门关闭时间,约 4 min. 计算得 $T=74\sim94$ 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 109.8 min,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 88.5 min,11 月份的平均闸次间隔时间为 87.5 min. 可见实行一闸室船舶待闸后,能有效缩短约 20 min 的闸次间隔时间.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十分显著.

4 完建期提高船闸通过能力措施实施效果

三峡船闸完建工程实施以来,通过采取 156.0 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,船闸仍保持了较高的通航效率,自 2006 年 9 月 15 日至 12 月 31 日共 108 d 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 万 t,日均货运量 10 万 t (其中下行 6.2 万 t),较 2005 年双线船闸的日均 9 万 t 提高了 11%.

参 考 文 献:

- [1] 胡亚安,张瑞凯,李 云. 三峡船闸完建期 156m 蓄水位 4 级运行方式原型调试研究[J]. 中国工程科学, 2009, 11(9): 52-58. (HU Ya-an, ZHANG Rui-kai, LI Yun. Study on four-step operational mode prototype debugging of TGP Lock under impounded level 156 m in the finishing construction period[J]. Engineering Sciences, China, 2009, 11(9): 58-58. (in Chinese))

- [2] HU Ya-an, ZHANG Rui-kai, LI Yun, et al. Prototype debugging on four-step operation mode of TGP lock under impounded level 156m during completion stage [C]//Proceeding of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 1924–1933.
- [3] 张瑞凯, 胡亚安, 李 云, 等. 三峡船闸中间级闸首输水系统调试及其阀门水动力学特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2005(增刊): 1–6. (ZHANG Rui-kai, HU Ya-an, LI Yun. Study on the hydrodynamic characteristics of the filling and emptying system and valve of the TGP Lock's intermediate step by prototype debugging[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(supp): 1–6. (in Chinese))
- [4] JTJ306–2001, 船闸输水系统设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001. (JTJ306–2001, Design code for filling and emptying system of shiplocks[S]. (in Chinese))
- [5] 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, 9(2): 164–169. (HU Ya-an, ZHANG Rui-kai. Synthetic research on hydraulic characteristics of culvert shapes behind valve for Three Gorges Shiplock [J]. Advances in Water Science, 1998, 9(2): 164–169. (in Chinese))
- [6] 曹光荣, 胡亚安, 高 雄. 优化输水方式提高三峡船闸通过能力措施研究[J]. 中国工程科学, 2007, 9(12): 75–80. (CAO Guang-rong, HU Ya-an, GAO Xiong. The research on improving the ability to pass over the Three Gorges Shiplock by optimizing hydraulic character[J]. Engineering Science, 2007, 9(12): 75–80. (in Chinese))

Research on improving the traffic capacity of the TGP ship lock during the completion period

HU Ya-an^{1,2,3}, ZHANG Rui-kai^{1,2,3}, LI Yun^{1,2,3}, ZONG Mu-wei^{1,2}, LI Jun^{1,2,3}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China*; 3. *Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing 210029, China*)

Abstract: In order to relieve the navigation pressure caused by the single lane operation of the TGP ship lock during its completion period, the authors put forward two innovative assumptions: one is to adopt the four-step operation mode instead of the five-step operation mode under water level 156.0 m, and the other is to change the vessels' waiting location from dolphins to the 1st chamber. Based on theoretical analyses, prototype debugging and full scale ship tests, the key technical problems of the super design head operation under four-step mode and the safety of berthing in the 1st chamber are all well solved by optimizing the conveyance mode of each lock head; the fluctuation characteristic in the 1st chamber and the relationship between it and the berthing vessel's mooring force are also clarified; and the adequate scheduling scheme considering the above results is put forward finally. The actual operation indicates that the above measures have greatly improved the traffic capacity of the TGP ship lock and achieved remarkable economic and social benefits during the completion period.

Key words: the TGP ship lock; completion period; traffic capacity; prototype debugging