



高水头大尺度船闸省水布置与水力计算*

刘本芹, 李云, 胡亚安, 宣国祥

(南京水利科学研究所, 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: 针对高水头大尺度船闸运行水力指标高带来的设计难度大以及船闸本身耗水量大等问题, 以水头 40 米级、闸室尺度 280 m×34 m 的船闸为例, 开展了省水布置方式研究。计算理论省水率, 分析阀门运行方式, 建立省水船闸输水数学模型, 模拟计算了输水水力指标。结果表明, 提出的设置 3 级蓄水池省水布置方式的理论省水率为 60%, 各项输水最大水力指标比非省水方案降低 18%~43%, 可简化船闸水力系统设计。

关键词: 船闸; 省水布置; 水力计算

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0042-05

Water-saving layout and hydraulic simulation of high head and large scale ship lock

LIU Ben-qin, LI Yun, HU Ya-an, XUAN Guo-xiang

(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: Aiming at high hydraulic indexes design difficulties and large water consumption of high head and large scale shiplock, water-saving design research is carried out based on shiplock which has 40 m grade water head and 280 m×34 m lock chamber. The theoretical water-saving rate is computed and the valve operation modes are analysed. The hydraulic indexes are calculated through mathematical model for water-saving shiplock. The results show that the theoretical water-saving rate of the shiplock with three-step storage basins proposed in this paper can reach to 60% and the maximum hydraulic indexes can reduce by 18%~43% compared with general layout. The water-saving layout can simplify the hydraulic system design.

Keywords: ship lock; water-saving layout; hydraulic simulation

船闸具有运量大、运行可靠、维护方便等优点, 在各国水路运输中得到普遍使用。在全球水资源短缺的大背景下, 水资源严重不足已经开始影响我国的水运发展, 枯水期船舶过闸与发电用水的矛盾日渐明显, 因此建设省水船闸、发展绿色航运是今后船闸建设的重要方向之一。省水船闸除具有节省船闸运行耗水量、保护珍贵的水资源这一明显优势之外, 还具有以下特点: 1) 把船闸工作水头分为几级, 从而降低了每级的

水位差, 可方便输水系统设计和施工; 2) 使高水头船闸阀门水力学问题更容易解决; 3) 减小最大输水流量, 有利于解决上、下游引航道水流条件问题。我国西部山区河流落差大, 船闸水头高, 为了满足航运需求, 船闸的建设规模逐渐向大尺度发展, 对于平面尺度达 280 m×34 m、单级水头达 40 米级的船闸而言, 其输水运行过程中的能量、输水体积、廊道流速等各项水力指标将显著增加, 给船闸设计带来极大难度, 而采用省水布

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402001); 交通运输部建设科技项目 (2013328746550)

作者简介: 刘本芹 (1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事通航建筑物水力学科研工作。

置方式可较好地解决这一问题。本文以某 40 米级水头大尺度船闸为例, 研究船闸省水布置方式, 在分析输水阀门运行方式的基础上, 建立数学模型计算输水水力特性, 并对比论证了其水力指标的优越性, 为我国省水船闸的深入研究及建设发展奠定基础。

1 工程概况及船闸特点

船闸的闸室有效尺度为 280 m×34 m×5.8 m (长×宽×门槛水深), 设计最大水头为 40.25 m, 对应的水位组合为上游最高通航水位 61.00 m 和下游最低通航水位 20.75 m, 设计代表船型为 3 000 吨级单船和 1+2×2 000 t 顶推船队。

该船闸具有以下特点: 1) 是国内平面尺度最大的单级船闸之一; 2) 是目前国内设计运行水头最高的单级船闸; 3) 一次输水体积为三峡船闸中

间级闸室的 2 倍左右; 4) 是世界上单位面积平均能量最大的船闸; 5) 航运地位重要, 是我国西南部内河黄金水道最重要的船闸工程之一。

若船闸采用单级非省水常规布置, 输水系统采用等惯性输水系统, 则经物理模型试验研究得到双边阀门匀速开启时间 $t_v = 7 \text{ min}$ 时几个关键水力学指标见表 1^[1], 一方面船闸运行耗水量巨大, 一次输水水体大约相当于 170 个标准游泳池的水量; 另一方面船闸充泄水能量及流速等指标均居国内外已建船闸之首, 且闸室水面升降速度已突破 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》规定的最大流速指标 6 cm/s ^[2], 这给输水系统设计及防空化措施研究提出了更高要求。为了节省船闸耗水量, 提高水资源综合利用率, 同时降低船闸运行各项水力指标, 保障船闸运行安全及可靠性, 对省水布置方式开展研究。

表 1 非省水布置方式下的输水水力指标

船闸布置	输水系统形式	一次输水体积/m ³	一次输水能量/kW	单位面积消耗能量/(kW/m ²)	单位空间消耗能量/(kW/m ³)
非省水方式	等惯性输水	4.2×10^5	13.99×10^4	13.40	2.31
输水最大流量/(m ³ /s)	平均输水时间/s	廊道最大流速/(m/s)	分流口最大流速/(m/s)	水面最大升降速度/(m/min)	惯性超高或超降/m
844	14.73	12.06	10.05	4.92	0.98, -1.18

2 省水布置方式

2.1 省水方式及水级划分

节省船闸运行耗水量的方式主要有 3 种: 1) 对于水头较高的船闸, 采用连续多级船闸布置方式, 在降低水力指标、减小技术难度的同时, 因每级船闸的运行水头降低可减少船闸一次运行耗水量, 节省航运用水; 2) 对于双线并列布置、同时建设的船闸, 在进行输水系统设计时可兼顾双线船闸相互充泄水运行的省水运行方式, 并通过船闸及船舶调度运行方式的协调加以实现互充互泄, 达到节省船闸运行耗水量的目的; 3) 在船闸侧面设置蓄水池, 通过蓄水池储存一部分水体, 船闸充泄水过程中通过闸室与蓄水池之间的水体输运实现部分水体的重复利用, 从而减少船闸运行一次耗水量, 节省水资源。前两种船闸省水方式的受限制因素较多, 只能在特定条件下使用。第 3 种省水方式可通过调整蓄水池级数和面积来

达到不同的省水率, 应用相对灵活, 我国乌江银盘船闸曾就这一省水布置形式开展过研究^[3]。本文船闸的水头和规模均大于银盘船闸, 且为单线单级船闸, 不具备前两种省水布置条件, 故确定采用设蓄水池的省水布置形式。

设蓄水池的省水船闸运行原理为: 泄水时先泄向高处的蓄水池, 再依次泄向低处的蓄水池, 剩余水量泄向下游; 充水时先从低处的蓄水池向闸室充水, 然后再依次到高处的蓄水池, 不足部分由上游补充。根据上述省水船闸运行原理, 得到其充泄水过程的理论省水率 E_w 与蓄水池的级数 m 、蓄水池与闸室面积比 κ 之间的关系如下:

$$E_w = \frac{\kappa m}{\kappa(m+1)+1} \times 100\% \quad (1)$$

根据式(1)得出图 1 中的关系曲线, 省水率随蓄水池级数及面积比的增大而增大, 但自蓄水池

级数 $m > 3$ 起, 随着蓄水池分级数量的增多, 省水率仅略有增长; 而与蓄水池面积 A_B 等于闸室面积 A 时的省水率相比, $A_B > A$ 时省水率增幅很小。由此确定蓄水池分级为 3 级, 每个蓄水池的面积与闸室面积相同, 这一省水方案的理论省水率为 60%。

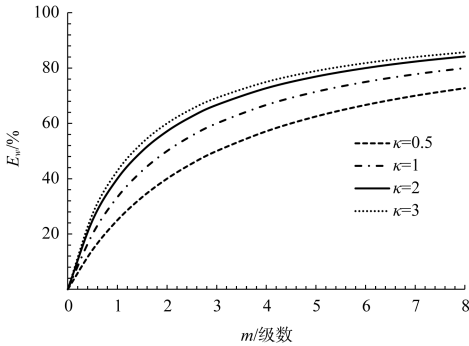


图1 省水率与蓄水池数量和大小的关系



图2 整体式省水布置方案蓄水池设置 (单位: m)

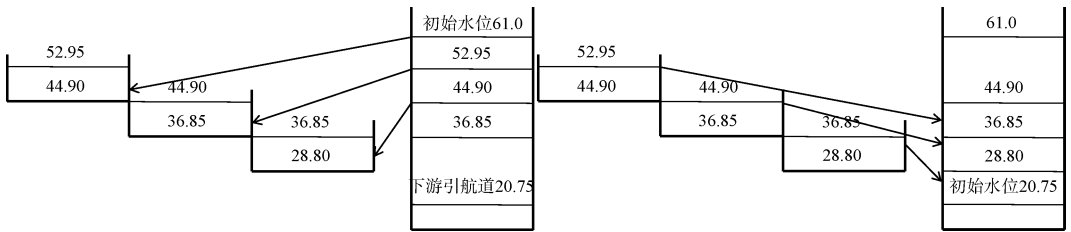


图3 分散式省水布置方案蓄水池设置 (单位: m)

2.2 输水系统特征尺寸

省水船闸闸室与蓄水池之间的水体交换是通过设有阀门的输水廊道实现的, 该廊道通向闸底的分流系统, 通过分流系统将蓄水池的水体分配至闸底相应的出水区段。只有使出水区段分布于整个闸室范围内, 确保充入的水体在多处尽可能同时、均匀地抵达闸室, 才能形成一个水力平衡系统。为实现这一目的, 采用闸墙长廊道闸底两区段纵支廊道侧支孔出水明沟消能的输水系统布

通过计算工程的水级划分, 确定各级蓄水池高程, 提出了整体式省水布置方案(图 2)和分散式省水布置方案(图 3)。

整体式方案为: 1) 闸室两侧沿高程方向各设 3 级蓄水池, 蓄水池为封闭式布置; 2) 每级蓄水池面积均与闸室面积相等, 蓄水池高度为 4.025 m, 上下两层相邻两级蓄水池底、顶高程差为 4.025 m; 3) 闸室与每一级蓄水池之间相互输水时均存在 1.5 m 的剩余水头, 即剩余水头 1.5 m 时开启下一级蓄水池的输水阀门。

分散式方案为: 1) 闸室左侧设置 3 个蓄水池, 蓄水池为开敞式布置; 2) 每级蓄水池面积均与闸室面积相等, 蓄水池内水体最大深度为 8.05 m, 相邻两级蓄水池的底高程相差 8.05 m; 3) 水位齐平时开启下一级蓄水池的输水阀门。

置形式, 闸室中部设置压力室, 上下游侧分别连接两支纵向输水廊道^[4]。

不论采用整体式还是分散式, 闸室从上游引航道充水以及向下游引航道泄水时的水头均为 16.1 m。该过程的充、泄水时间以 10 min 控制, 通过计算闸室与上、下游引航道的充、泄水阀门处廊道断面面积, 以及闸室与省水池相连的输水廊道控制断面面积, 提出表 2 中的输水系统特征尺寸。

表 2 省水布置方式输水系统特征尺寸

部位	面积/m ²	与阀门面积比
上闸首进口	进口 560.0 喉部 120.4	进口 10.18 喉部 2.19
阀门段廊道	55.00	1.00
闸墙纵向主廊道	70.00	1.27
闸室中部压力室	96.00	1.75
省水池廊道	76.00	1.38
闸室出水段廊道	120.00	2.18
闸室出水支孔	100.44	1.83
下闸首出口	112.50	2.04

3 阀门运行方式及输水水力指标

3.1 阀门运行方式

本文提出的两种省水方案虽然在蓄水池布置方面存在差别, 但实际运行过程是一致的, 其闸室与上下游之间的输水运行水头均为 16.1 m, 仅闸室与各级蓄水池之间的输水运行水头略有差别, 在 14.5~16.1 m。可见, 采用省水布置后每一输水过程的初始水头均得到显著降低, 此时输水阀门开启速度也可适当加快。国外一些省水船闸建设和运行实践较多的国家, 在初始水头 8.0~9.0 m 时蓄水池廊道阀门开启时间仅约 1.2 min, 对比分析国内外相关研究及实践检验数据, 提出闸墙主廊道输水阀门开启方式采用匀速 $t_v = 4 \sim 5$ min, 并采用动水关闭阀门的措施降低输水末期的惯性超高或超降, 而省水池阀门开启时间采用匀速 $t_v = 2.0 \sim 2.5$ min。

3.2 数学模型

图 4 为设有 3 级省水池的省水船闸输水通用概化图, 同时根据 Bernoulli 方程, 写出描述包含船闸闸室各种输水过程的非恒定流方程组:

$$h_i - h_m = (\zeta_{ia} + \zeta_{iv} + \zeta_{ib}) \frac{Q_i^2}{2gA_i^2} + \zeta_m \cdot \frac{Q_m^2}{2gA_m^2} + \frac{L_{ia} + L_{ib}}{gA_i} \cdot$$

$$\frac{dQ_i}{dt} + \frac{L_m}{gA_m} \cdot \frac{dQ_m}{dt} \quad (2)$$

$$Q_i(t) = -S_i \frac{dh_i(t)}{dt} \quad (3)$$

$$Q_m(t) = S_m \frac{dh_m(t)}{dt} \quad (4)$$

$$Q_m(t) = \sum Q_i(t) \quad (5)$$

式中: h 为各闸室水位; A 为各廊道计算断面面积; S 为各闸室水域面积; Q 为各廊道段的流量; ζ 为各廊道段阻力系数; ζ_v 为各阀门阻力系数; L 为廊道换算长度; g 为重力加速度。

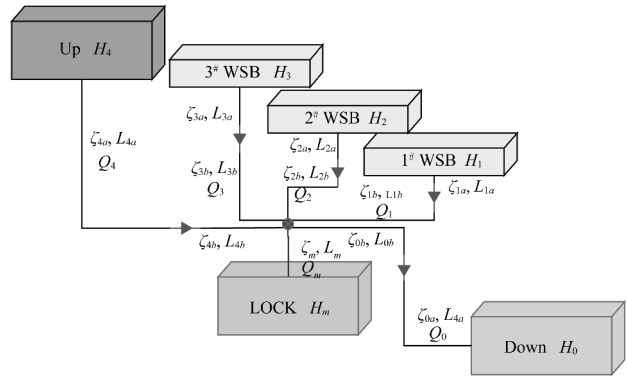


图 4 设省水池的省水船闸输水过程概化

针对基本方程组, 令 $S_4 \rightarrow \infty$ 、 $S_0 \rightarrow \infty$, 则转化为单级船闸设 3 级省水池的省水布置运行方式。

采用差分法和迭代法求解上述方程组, 模拟省水船闸输水运行产生的水力特性变化, 计算各输水过程的水力特征值及各项水力指标。

3.3 输水水力指标

分析了输水基本水力参数, 采用数学模型计算得出表 3 中各个输水过程的水力特征值, 当闸墙主廊道输水阀门开启时间 $t_v = 4 \sim 5$ min、蓄水池廊道阀门开启时间 $t_v = 2.0 \sim 2.5$ min 时, 输水过程最大流量、水面升降最大速度及廊道最大流速等指标分别降低 18%~42%、20%~43% 和 20%~35%, 在节省船闸运行耗水量的同时, 有效降低了输水水力指标, 尤其闸室与上下游之间输水时的最大流量得到了有效控制 (图 5), 有利于改善引航道水流条件, 保障船舶在引航道内的停泊和航行安全。

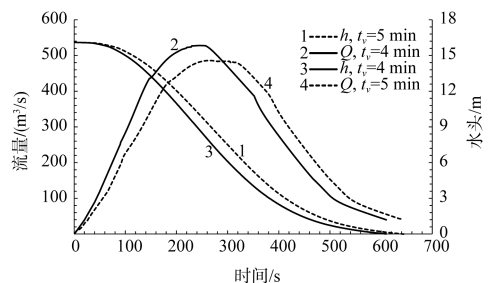


图 5 闸室与上 (下) 游之间输水时的水力特征曲线

根据单过程输水指标提出表 4 中的 4 种阀门运行方式组合, 主廊道阀门开启方式采用“ $t_v = 4 \sim 5 \text{ min} + \text{动水关阀}$ ”, 省水池廊道阀门开启方式采用“ $t_v = 2.0 \sim 2.5 \text{ min}$ ”。4 种运行组合方式下, 蓄水池整体式布置方案的充水或泄水总时间在

19.92~21.18 min, 分散式布置方案的充水或泄水总时间在 19.68~20.88 min, 一次过闸过程的总输水时间比非省水布置方式约延长 5.0~6.5 min, 但理论省水率可达 60%, 同时输水系统及防空化措施等方面的布置也可相对简单, 便于施工维护。

表 3 各输水过程的水力特征值

行过程	t_v/min	T'/min	$Q_{\max}/(\text{m}^3/\text{s})$	$U_{\max}/(\text{m}/\text{min})$	$\bar{U}/(\text{m}/\text{min})$	$v_{\max}/(\text{m}/\text{min})$
闸室与上下游输水	4.0*	10.17	529	3.03	1.58	9.62
	5.0*	10.68	486	2.78	1.51	8.84
闸室与省水池输水 (整体式)	2.0	3.25	641	3.67	2.48	8.43
	2.5	3.50	595	3.41	2.30	7.83
闸室与省水池输水 (分散式)	2.0	3.17	690	3.95	2.54	9.08
	2.5	3.40	633	3.63	2.37	8.33
指标降低幅度/%			18~42	20~43	7~45	20~35

注: t_v 为阀门开启时间, T' 为单个输水过程的输水时间, Q_{\max} 为最大流量, U_{\max} 为闸室水面最大升降速度, \bar{U} 为闸室水面平均升降速度, v_{\max} 为输水阀门处廊道断面最大流速。* 表示剩余水头 4.0 m 时动水关阀至 0.4 开度, 关阀速度 $t_{v,关} = 5 \text{ min}$ 。

表 4 4 种运行组合下的输水总时间

运行组合	主廊道阀门开启时间/min	主廊道关阀水头/m	动水关阀时间/min	省水池阀门开启时间/min	总输水时间/min	
					整体	分散
1	4	4.0	5	2.0	19.92	19.68
2	5	4.0	5	2.0	20.43	20.19
3	4	4.0	5	2.5	20.67	20.37
4	5	4.0	5	2.5	21.18	20.88

4 结语

在天然流量不足需要节约航运用水的河段, 建造省水船闸是今后的发展趋势。国际航运协会指导船闸设计的行业研究报告《Innovations in Navigation Lock Design》中建议: 对于闸室长度大于 200 m、水头大于 15 m 的大型船闸, 即使设计了最为经济高效的输水系统, 也需对省水船闸方案进行对比研究。

本文在我国省水船闸研究及建设较少的现状背景下, 针对水头超过 40 m、闸室有效尺度达 280 m×34 m 的 I 级船闸输水水力指标高带来的船闸设计难度大以及运行耗水量大等问题, 采用计

算分析与数学模型相结合的方法, 开展了省水方案布置、运行方式及水力特性研究, 得出以下结论: 1) 提出的设置 3 级蓄水池的两种省水布置方式的理论省水率可达 60%; 2) 与非省水常规布置相比, 省水布置方式总输水时间延长 6 min 左右, 但船闸运行各项最大水力指标降低 18%~43%, 可减小船闸设计难度, 便于施工维护, 具有一定的工程推广应用价值。

参考文献:

- [1] 胡亚安, 宣国祥, 李君, 等. 高水头巨型船闸输水系统水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- [2] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [3] 陈明栋, 杨斌, 杨忠超, 等. 省水船闸在高坝通航中的应用[J]. 水运工程, 2008(12): 114-118.
- [4] 刘本芹, 胡亚安. 高水头巨型单级省水船闸输水系统水力学研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.

(本文编辑 武亚庆)