



金家堰省水船闸 互通式短廊道输水系统计算*

何良德¹, 戈国庆², 杨晓松², 高涛², 陈奕瞳¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 2. 山东省交通规划设计院, 山东济南 250031)

摘要: 小清河复航工程已开工建设, 其中金家堰船闸、王道船闸将成为我国首批带省水池的船闸。结合金家堰船闸省水廊道与闸首廊道互通的特点, 分析上、下游与省水池直通输水的可能性, 提出相应的水力计算方法。基于兼顾输水时间和省水率的原则, 推导出闸首阀门最优提前开启时间与省水池阀门提前关闭时间的关系式。结果表明, 金家堰船闸的廊道布置使直通输水时阻力系数较大, 有效限制了回流量; 闸首阀门不超过最优提前时间时, 省水率的变化极小, 可按常用公式估算, 廊道互通的影响也可忽略不计。

关键词: 省水船闸; 输水系统; 互通廊道; 最优提前时间; 省水率

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0064-07

Calculation of filling and emptying system with interconnected short culvert for Jinjiayan water-saving lock

HE Liang-de¹, GE Guo-qing², YANG Xiao-song², GAO Tao², CHEN Yi-tong¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Jinan 250031, China)

Abstract: The project of recovery navigation in the Xiaoqing River has been started construction, among which the Jinjiayan Lock, the Wangdao Lock will become the first batch of locks with water-saving basins in China. According to the characteristics of the interconnection between the culvert of water-saving basin and the culvert of lock head for the Jinjiayan Lock, we analyze the possibility of direct water conveyance between the upstream or downstream approach channel and the water-saving basin, and propose the corresponding hydraulic calculation method. Based on the principle of considering both the filling time and the water-saving rate, we deduce the relational expression between the optimal time to open earlier the lock head valve and the time to close earlier the water-saving basin valve. The results show that the culvert layout of the Jinjiayan Lock makes the resistance coefficient of direct water conveyance relatively large and effectively limits the return flow. When the lock head valve opens no earlier than the optimal time, the change of the water-saving rate is tiny which can be estimated by the common formula, the influence of the culvert interconnection is negligible.

Keywords: water-saving lock; filling and emptying system; interconnected culvert; optimal earlier time; water-saving rate

收稿日期: 2020-05-09

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402007); 山东省交通运输科技项目(2017B79); 通航建筑物建设技术交
通行业重点实验室开放基金资助项目(YT918001)

作者简介: 何良德(1964—), 男, 硕士, 副教授, 从事港口与航道工程教学和科研。

采用低坝渠化、多级船闸、双线互通船闸^[1](孪生船闸)、带省水池船闸、带中间闸门或带泵站船闸^[2]等形式或措施,可以节省船闸运行时的用水量,其中带省水池的船闸是最普遍采用的省水船闸形式^[3]。

德国是已建省水船闸最多的国家,据29座省水船闸统计,最大水头24.67 m,省水池大多采用2~3级的分散式布置。巴拿马运河第三线船闸为连续三级海船闸,每级闸室配置3级分散式省水池,船闸综合省水率高达87%。我国自20世纪70年代末开始,相继开展了江淮运河郑家岗、颍河鹿邑、乌江银盘、白马、小清河复航工程等省水船闸布置与输水系统水力特性试验研究^[4-7]。

省水船闸输水系统可分为连接上、下游或上、下级闸室与本级闸室的输水系统(主系统)以及连接省水池与本级闸室的输水系统(省水系统)。主系统、省水系统应分别满足各自分担水头的设计要求。如非省水运行时,主系统应满足独自承担总水头的设计要求。

已建省水船闸大多采用分散输水系统,主系统与省水系统廊道在闸室墙或底板内互通^[8]。小清河复航工程的船闸水头低,采用集中输水系统^[9],金家堰船闸的省水池输水廊道分别与上、下闸首廊道互通,王道船闸的省水系统独立布置于闸室中部。小清河船闸现已开工建设,将成为国内首批带省水池的船闸。

省水船闸输水时间等于省水系统与主系统输水时间之和,省水阀门提前关闭^[10]、后续阀门提前开启均可节省输水总时间。杨忠超等^[11]、刘本芹等^[12]通过求解上、下游或省水池与闸室间能量方程、水量平衡方程,研究省水船闸的水力特性。本文结合金家堰省水船闸省水廊道与闸首廊道互通设计情况,探讨上、下游与省水池直接输水的可能性,基于兼顾输水时间和省水率的原则,研究闸首阀门与省水阀门提前量之间关系,给出闸首阀门最优提前量估算公式,并分析廊道互通产生的影响。

1 金家堰省水船闸输水系统

1.1 船闸概况

小清河复航工程起自济南港主城港区,终于潍坊西港区羊口作业区,全长169.2 km,Ⅲ级航道设计船型为1 000吨级,沿途布置4座Ⅱ级船闸。根据水资源分析^[13],要求水牛韩(预留)、金家堰、王道为省水船闸,金家桥为普通船闸。省水船闸均采用带1个省水池的短廊道集中输水系统布置方案,省水池水域面积与闸室水域面积相等,理论省水率可达33.3%。

金家堰船闸^[14]位于右岸,基本尺度为340 m×34 m×5 m(有效长度×有效宽度×门槛水深),上闸首长41.2 m、闸室长290 m、下闸首长41.0 m。引航道采用曲进直出的不对称布置,底宽为70 m、最小水深4.65 m,导航调顺段长230 m、停泊段长300 m。

金家堰船闸设计水位及其组合见表1。运行期上下游最大水头差 $H=5.4$ m,水头差 $H>3.0$ m时考虑省水运行,表1中后3种组合(最高通航水位~正常蓄水位)的省水池储水高度1.5~1.8 m、水位5.70~8.07 m,省水池底高程4.5 m、顶高程8.5 m。

表1 金家堰水位组合

水位组合	上游水位/m	下游水位/m	水头差 H /m
20 a 一遇防洪水位	12.36	12.19	0.17
最高通航水位(1/5除涝水位)	11.23	8.60	2.63
最低通航水位(渠化水位)	8.7	4.2	4.5
正常蓄水位	9.6	5.0	4.6
最不利组合	9.6	4.2	5.4

金家堰船闸水系统如图1所示,包括闸首输水系统和省水池输水系统两部分。

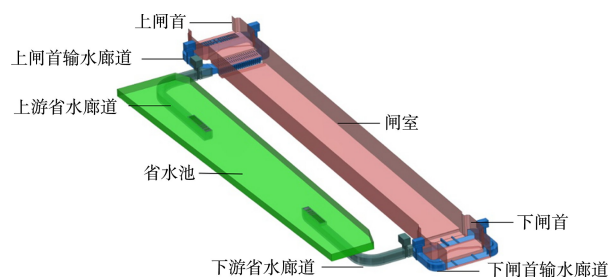


图1 金家堰省水船闸互通式短廊道输水系统

1.2 闸首集中输水系统

考虑到非省水运行的情况，闸首输水系统按照最大水头差 $H=5.4\text{ m}$ 设计。闸首阀门段廊道断面面积 $\omega=40\text{ m}^2$ ，两侧边墩内环形平底短廊道对称布置，转弯段内侧半径 2.5 m 、上、下闸首外侧半径分别为 6.5 、 8.0 m 。

上闸首进水口采用槛上多支孔的布置形式，4组×14个进水支孔，总面积 108.3 m^2 ，槛顶水深为

5.7 m 。廊道进口 $6.5\text{ m}\times 5\text{ m}$ (宽×高,下同)，出口段转弯 90° 渐扩为 $7.5\text{ m}\times 5\text{ m}$ ，顶部再渐缩为 $7.5\text{ m}\times 4\text{ m}$ ，进入帷墙消能室。两侧廊道水流对冲消能后，经正面和顶部格栅消能，然后进入闸室。消能室淹没水深 2.0 m ，体积 $1\ 020\text{ m}^3$ ，顶部出水支孔 $4\text{组}\times 11\text{个}$ ，正面出水支孔 $2\text{组}\times 11\text{个}$ ，消能室出水支孔总面积 $\omega_{ed}=117.04\text{ m}^2$ ，正面与顶部出水孔面积比为 3.03 。上闸首输水系统平面布置如图 2 所示。

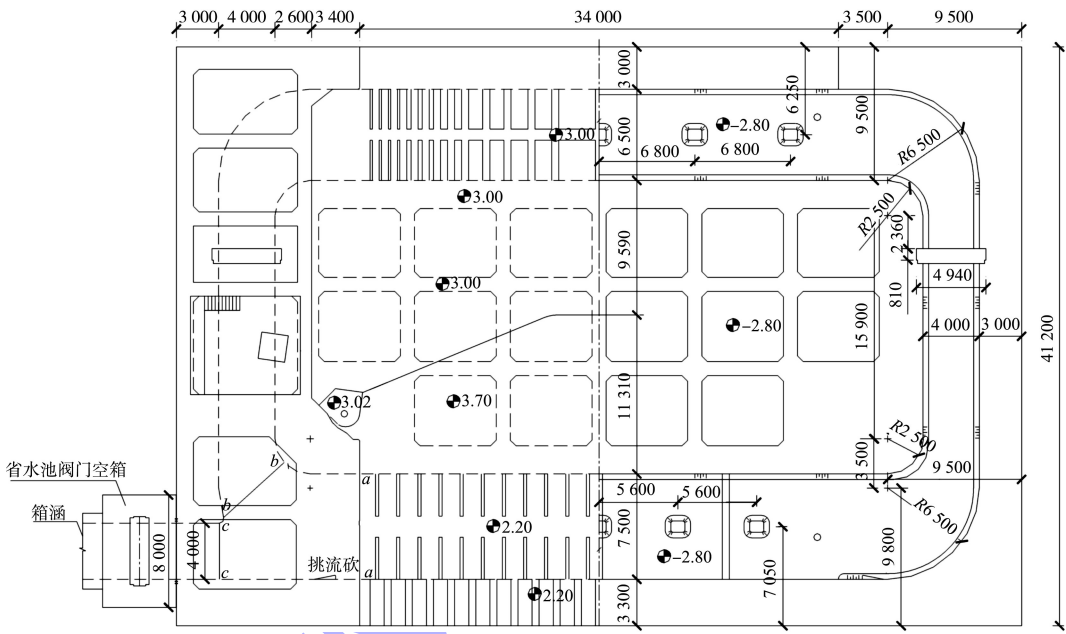


图 2 上闸首输水系统布置 (高程: m; 尺寸: mm)

下闸首进水口采用门龕内侧向进水口的布置形式。廊道进口 $7.5\text{ m}\times 5\text{ m}$ ，淹没水深 7.0 m ；出口转弯段渐扩为 $8.7\text{ m}\times 5\text{ m}$ ，淹没水深 2.5 m 。出水口采用设置消力坎的简单消能布置，经分流墩导流后对冲消能。

1.3 省水池输水系统

本文分别用下标 b 、 d 表示省水池输水系统、闸首输水系统相应的变量。带 1 个省水池的船闸运行时，将船闸水头 H 分为 3 级，省水阀门初始工作水头 H_b 、闸首阀门初始工作水头 H_d 均为 $2H/3=3.6\text{ m}$ 。综合考虑船闸运行时维护的便捷性，省水阀门段与闸首阀门段廊道尺寸一致，即面积 $\omega=40\text{ m}^2$ ，省水阀门段廊道面积 ω_b 与闸首阀门段廊道面积 ω_d 均为 40 m^2 。

省水池输水系统分为上游、下游 2 个输水廊

道，分别与上、下闸首的一侧短廊道采用平交连接互通方式。上闸首汇合廊道与格栅消能室连接处设置一个挑流坎，以避免省水池向闸室输水时集中在正面。下闸首进水口外设置 3 道消力坎，以确保省水池向闸室输水时出流均匀。

省水池底部上、下游侧分别布置 1 个进(出)水口 $25.0\text{ m}\times 4.0\text{ m}$ (长×宽)，顶部各设 15 个进出水孔，总面积为 140.8 m^2 ，淹没水深 1.2 m 。

2 非交叉启闭的输水系统计算

2.1 阀门启闭时间

按照《船闸输水系统设计规范》^[15] 计算输水系统各项阻力系数，上闸首格栅消能室、省水池进(出)水口的阻力系数：

$$\xi_{ex} = 1/\sin^2 \left(k_f \cdot \frac{\omega_{ed}}{\omega_{ec}} \right) \quad (1)$$

式中: ξ_{ex} 为输水廊道出水支孔段局部阻力系数, 包括出水孔的损失在内; ω_{et} 为出水支孔控制断面总面积; ω_{ec} 为出水支孔段的廊道断面面积; k_f 为出水支孔形状系数。

省水池上游廊道向闸室充水时, ω_{et} 取消能室出水孔总面积 ω_{ed} , 上闸首两侧廊道对称充水时, ω_{et} 应取 $\omega_{ed}/2$ 。计算可得, 闸室充水时上闸首阀门全开时阻力系数 $\xi_d = 1.535$ 、流量系数 $\mu_d = 0.807$, 省水池阀门全开时阻力系数 $\xi_b = 1.258$ 、流量系数 $\mu_b = 0.892$; 闸室泄水时下闸首 $\xi_d = 1.245$ 、 $\mu_d = 0.896$, 省水池 $\xi_b = 1.307$ 、 $\mu_b = 0.875$ 。

闸室充水时, 阀门开启时间 t_v 受开启初期的闸室波浪力控制。匀速开启时:

$$t_v \geq \frac{k_f \omega DW \sqrt{2gH}}{[P_L](\omega_c - \chi)} \quad (2)$$

此时锐缘平面阀门系数 $k_f = 0.725$, 1 000 t 船舶允许纵向力 $[P_L] = 32.0$ kN, $2 \times 1\,000$ t 顶推船队排水量 $W = 2\,850.8$ t, 船队三列时船舶浸水横断面积 $\chi = 76.5$ m²。

第1阶段省水廊道输水时, 式(2)中 H 为省水阀门水头 $H_b = 3.6$ m, 初始水位的闸室横断面面积 $\omega_c = 170$ m²。省水池上、下廊道流量系数接近相等, 同步向闸室充水时, 可近似认为闸室水域上下游对称, ω 应取一个阀门处廊道面积 20 m², 顶推船队长度 133.4 m, 接近水域长度的一半, 波浪力系数可取 $D \approx 1.0$, 计算得 $t_v \geq 120$ s, 省水阀门开启时间 t_{bv} 取 130 s。

第2阶段闸首廊道输水时, 式(2)中 H 为闸首阀门水头 $H_d = 3.6$ m, 开启初期闸室横断面面积 $\omega_c = 231.2$ m², ω 应取两个阀门处廊道面积 40 m², 计算得波浪力系数 $D = 1.643$ 、 $t_v \geq 231$ s, 闸首阀门开启时间 t_{dv} 取 240 s。

2.2 输水时间与停泊条件

输水系统的基本积分方程为:

$$\int_{t_1}^{t_2} \mu_t dt = -\frac{C}{\omega \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH_t}{\sqrt{H_t}} = \frac{2C}{\omega \sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}) \quad (3)$$

式中: μ_t 为输水系统流量系数; C 为计算水域面积; ω 为阀门处廊道总面积; H_t 为水头差; H_1 、 H_2 分别为对应 t_1 、 t_2 时刻的水头差。

在省水池系统计算时, 对省水阀门开启过程(开启时间 t_{bv})、阀门保持全开的停顿过程(停顿时间 t_p)、阀门关闭过程(关闭时间 t_{bc}) 分别进行积分求解, 最后可得阀门全关时剩余水头 e 为:

$$\sqrt{e} = \sqrt{H_b} - \frac{\mu_b \omega_b \sqrt{2g}}{2C_b} [\alpha_b(t_{bv} + t_{bc}) + t_p] \quad (4)$$

式中: H_b 为省水池输水系统的水头差; ω_b 为省水阀门段廊道面积; C_b 为省水系统的计算水域面积, 其值为 $mS/(1+m)$, 其中 S 为闸室水域面积, m 为省水池与闸室水域面积比; α_b 为阀门启闭时流量积分面积系数。

如保持阀门开启时间 t_{bv} 、关闭时间 t_{bc} 不变, 使得阀门全关时剩余水头 $e = 0$ m 的临界停顿时间为:

$$t_{pc} = \frac{2C_b \sqrt{H_b}}{\mu_b \omega_b \sqrt{2g}} - \alpha_b(t_{bv} + t_{bc}) \quad (5)$$

如果式(5)的临界停顿时间 $t_{pc} < 0$, 说明阀门需要采用局部开启方式。式(4)整理后可得省水池输水时间为:

$$T_b = \frac{2C_b(\sqrt{H_b} - \sqrt{e})}{\mu_b \omega_b \sqrt{2g}} + (1 - \alpha_b)(t_{bv} + t_{bc}) \quad (6)$$

式(6)中取 $e = 0$ m、 $t_{bc} = 0$ s 时, 即为常见的输水时间计算公式, 取用闸首输水系统相应参数时可计算闸首输水时间。

闸室输水时, 闸室内停泊条件要求取 $t_{dv} = 240$ s、 $t_{bv} = 130$ s, 省水阀门关闭时间主要受启闭机械操作性能控制, 取 $t_{bc} = 90$ s。当 $e = 0$ m 时, 省水池阀门需要停顿时间 $t_{pc} = 25$ s, 省水池向闸室充水时间 $T_b = 244$ s、上闸首充水时间 $T_d = 413$ s, 合计 $T = 657$ s。闸室泄水时停泊条件相对好些, 阀门启闭方式可与闸室充水时相同。闸室向省水池泄水时间 $T_b = 245$ s、下闸首泄水时间 $T_d = 389$ s, 合计 $T = 634$ s。

经水力特性计算表明, 泄水时闸室、上游引

航道以及充水时闸室、下游引航道的船舶纵向水流作用力 P_L 的最大值分别为 31.2、26.3、13.8、28.5 kN，均小于允许纵向系缆力 $[P_L] = 32.0$ kN，满足船舶停泊条件。泄水时闸室 P_L 远小于充水时 P_L ，上、下游引航道 P_L 接近相同。

充水时闸室、泄水时下游引航道 P_L 曲线，见图 3。省水廊道、闸首廊道先后输水时，在阀门开启初期闸室 P_L 均出现正向峰值，阀门全开前发生最大流量后， P_L 作用方向改变直至负向峰值，省水阀门关闭末期， P_L 逐渐减小为零，而闸首阀门无关闭过程， P_L 维持峰值到输水结束。本文计算确定的阀门启闭方式、输水时间、船舶系缆力等水力学参数，与文献[9]的模型试验结果基本吻合。

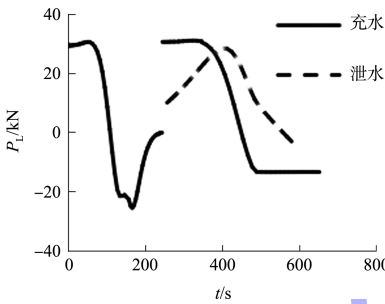


图 3 船舶纵向水流作用力 P_L 曲线

2.3 省水阀门提前关闭的影响

设实际采用的停顿时间 $t_p = t_{pc} - t_{be}$ (t_{be} 为省水阀门提前关闭时间)。将式(5)代入式(4)可得：

$$\sqrt{e} = \frac{\mu_b \omega_b \sqrt{2g}}{2C_b} t_{be} \quad (7)$$

式(7)表明，如 $t_p > t_{pc}$ ，延迟关闭阀门， $t_{be} < 0$ s，省水阀门全关时，输水已经结束；如 $t_p \leq t_{pc}$ ，提前关闭阀门， $t_{be} > 0$ s， $e > 0$ m，省水阀门全关时，有剩余水头。

根据省水率 E_b 的定义有：

$$E_b = n \cdot \frac{mh_b}{H} \quad (8)$$

式中： H 为船闸总水头； h_b 为省水池储水高度； n 为省水池级数； m 为省水池与闸室水域面积比。

仅省水阀门提前时，省水率 E_b 计算公式为：

$$E_b = \frac{mn(1-2e/H)}{[1+m(n+1)]} \quad (9)$$

式中： e 为剩余水头， $2e$ 可理解为闸室充水与泄水剩余水头之和。

提前关闭缩短省水系统输水时间 $\Delta T_b = t_{be}$ ，在 n 级省水池船闸中，节省的输水时间 $\Delta T \approx nt_{be}$ 。金家堰船闸 $H = 5.4$ m、 $m = 1$ 、 $n = 1$ ，如 $t_{be} = 0$ s 时， $e = 0$ m， $E_b = 33.3\%$ ；如 $t_{be} = 25$ s 时，最大剩余水头 $e_{max} = 0.12$ m，节省时间 $\Delta T \approx 25$ s，省水率有所降低， $E_b = 31.9\%$ 。分别取 $t_p = 0$ 、10、20、25 s 计算，充泄水循环稳定后的 $t_{be} - e$ 关系曲线如图 4 所示。可见 t_p 越大， t_{be} 越小，省水池剩余水头 e 越小。由于省水系统充泄水性能差异，剩余水头 e 有所不同。

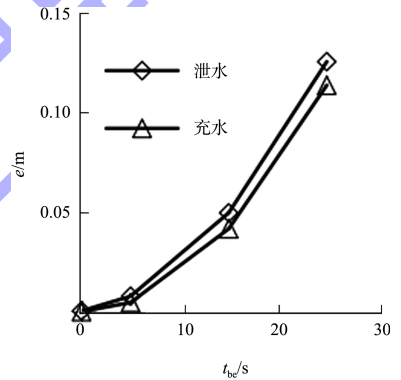


图 4 输水循环稳定后 $t_{be} - e$ 关系曲线

3 交叉启闭的输水系统计算

在省水阀门全关之前，提前开启闸首阀门可进一步节省输水时间。在交叉启闭期，如廊道互通时，可能出现上游水体直接输入省水池或者省水池水体直接泄到下游的情况。

3.1 计算方法

以闸室充水为例，充水时设上闸首右侧廊道 1、省水池上游廊道 2、上闸首左侧廊道 3、省水池下游廊道 4，阀门处断面面积 $\omega_i = 20$ m²、流量 Q_i 。上游水位 h_1 、省水池水位 h_2 、闸室水位 h_3 ，相应水域面积为 S_1 、 S_2 、 S_3 。廊道 1 与廊道 2 互通，出口流量 Q_m 为 Q_1 与 Q_2 之和，面积 $\omega_m = 30$ m²。

如 $Q_2 \geq 0$ ， Q_1 、 Q_2 合流为 Q_m 进入闸室，可分别建立 $h_1 - h_3$ 、 $h_2 - h_3$ 的 Bernoulli 方程：

$$h_1 - h_3 = \xi_{c1} \cdot \frac{Q_1^2}{2g\omega_1^2} + \xi_{cm} \cdot \frac{Q_m^2}{2g\omega_m^2} \quad (10)$$

$$h_2 - h_3 = \xi_{c2} \cdot \frac{|Q_2| |Q_2|}{2g\omega_2^2} + \xi_{cm} \cdot \frac{Q_m^2}{2g\omega_m^2} \quad (11)$$

式中: ξ_{c1} 、 ξ_{c2} 为廊道 1、2 分别在合流出口 $a-a$ (图 2) 之前的阻力系数; ξ_{cm} 为廊道出口阻力系数。

出现 $Q_2 < 0$ 时, 认为 Q_1 在断面 $b-b$ 分流为 Q_2 、 Q_m , 关于 $h_1 - h_3$ 、 $h_1 - h_2$ 的方程为:

$$h_1 - h_3 = \xi_{d1} \cdot \frac{Q_1^2}{2g\omega_1^2} + \xi_{dm} \cdot \frac{Q_m^2}{2g\omega_m^2} \quad (12)$$

$$h_1 - h_2 = \xi_{d1} \cdot \frac{Q_1^2}{2g\omega_1^2} - \xi_{d2} \cdot \frac{|Q_2| |Q_2|}{2g\omega_2^2} \quad (13)$$

式中: ξ_{d1} 、 ξ_{dm} 为廊道 1 在分流口 $b-b$ 前、后阻力系数; ξ_{d2} 为从分流口 $b-b$ 转弯到断面 $c-c$ 以及廊道

2 的阻力系数。

廊道 1、2 方程式表示为式 (14), 廊道 3、4 的方程表示为式 (15):

$$\begin{cases} h_1 - h_3 = \xi_1 \cdot \frac{Q_1^2}{2g\omega_1^2} + \xi_m \cdot \frac{Q_m^2}{2g\omega_m^2} \\ h_2 - h_3 = \xi_2 \cdot \frac{|Q_2| |Q_2|}{2g\omega_2^2} + \xi_m \cdot \frac{Q_m^2}{2g\omega_m^2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} h_1 - h_3 = \xi_3 \cdot \frac{Q_3^2}{2g\omega_3^2} \\ h_2 - h_3 = \xi_4 \cdot \frac{|Q_4| |Q_4|}{2g\omega_4^2} \end{cases} \quad (15)$$

式 (10)~(15) 中, 对应 Q_i 项的阻力系数, 还包括相应阀门的阻力系数。闸室充水时上闸首廊道、省水池上游廊道的阻力系数见表 2。

表 2 闸室充水时廊道阻力系数

时段	ξ_1	ξ_2	ξ_m	ξ_3	ξ_4
廊道不互通或非交叉启闭期	1.535	1.346/1.376	0	1.535	1.179/1.243
廊道互通且交叉启闭期	1.034/0.812	0.901/3.351	1.127/1.627	1.535	1.179/1.243

注: “/” 后为出现回流时系数值; 其他为不出现回流或不受回流影响的系数值。

根据连续条件有:

$$Q_1 + Q_3 = -S_1 \frac{dh_1}{dt} \quad (16)$$

$$Q_2 + Q_4 = -S_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^4 Q_i = S_3 \frac{dh_3}{dt} \quad (18)$$

式 (14)~(18) 共有 7 个关系式, 用差分法可解得 h_i 、 Q_i 等 7 个未知数。

3.2 省水池的回流

为便于考察, 设闸首阀门与省水阀门同时开启, 廊道互通时, 省水廊道 Q_2 、 Q_4 曲线见图 5。初期 $Q_2 > 0$, 与 Q_1 汇流在出口水头损失大, 因此 $Q_2 < Q_4$; 在后期 $Q_2 < 0$, 由上游 Q_1 分流至省水池的流量, 沿程局部阻力系数大, 但上游 h_1 与省水池 h_2 水头差大, 廊道 2 回流量大于廊道 4 ($|Q_2| < |Q_4|$), 且较早发生。

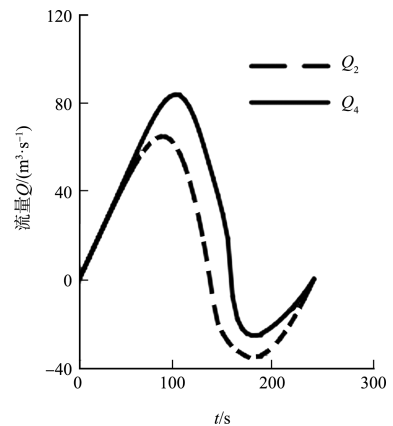


图 5 省水廊道流量曲线

闸首阀门相对于省水阀门全关时刻, 提前开启 245 s, 可缩短输水时间约 206 s, 但开启过早导致后期产生回流, 影响省水阀门关闭时水位, 严重降低省水率。计算中, 分流口 $b-b$ 转弯到断面 $c-c$ 的阻力系数 $\xi_{b-c} = 2.051$, $E_b = 8.92\%$; 如取 $\xi_{b-c} = 0$, 则 $E_b = 7.96\%$; 取 $\xi_{b-c} = +\infty$, 则 $E_b = 14.09\%$ 。可见 ξ_{b-c} 越大, E_b 越高。

3.3 闸首阀门最优提前开启时间

使得省水池不出现回流 ($Q_2 + Q_4 \geq 0$) 的闸首阀门最大提前时间称为最优提前开启时间 t_{de} 。在交叉启闭期, 闸首平板阀门开启度 $\beta < 0.3$ 时, 阻力系数 $\xi \approx a\beta^2$ (其中系数 $a = 1.9$)^[16], 由于闸首初始水头 H_d 较大, 水头变化相对较小, 闸首流量 Q_d 可近似为:

$$Q_d = \mu_r \omega_d \sqrt{2gH_d} \approx \frac{\omega_d \sqrt{2gH_d}}{t_{dv} \sqrt{a}} t \quad (19)$$

式中: ω_d 为闸首输水系统阀门处面积; t_{dv} 为闸首阀门开启时间。

差分解表明, 在廊道不互通时, 闸首 Q_d 在 t_{de} 内进入闸室的水体 $V \approx eS$, 由式(7)、(19)可得 t_{de} 与 e 或 t_{be} 的关系式:

$$t_{de} = \sqrt{\frac{2St_{dv}\sqrt{a}}{\omega_d \sqrt{2gH_d}}} e = \sqrt{\frac{2St_{dv}\sqrt{a}}{\omega_d \sqrt{2gH_d}}} \cdot \frac{\mu_b \omega_b \sqrt{2g}}{2C_b} t_{be} \quad (20)$$

平板阀门 $a = 1.9$ 、闸室面积 $S = 11\,278\text{ m}^2$ 、流量系数 $\mu_b = 0.892$ 、水域面积 $C_b = 5\,639\text{ m}^2$, 通过式(20)计算得 $t_{de} = 148.99\sqrt{e}$, $t_{de} = 2.07t_{be}$, 分别与差分法拟合的斜率 151.82、2.15 接近, $t_{de} - t_{be}$ 关系见图 6。

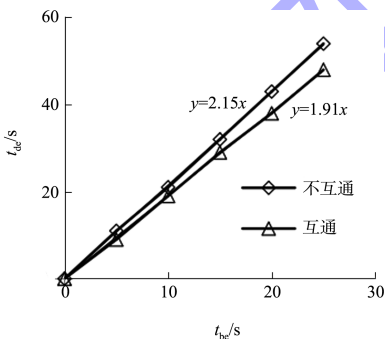


图 6 $t_{de} - t_{be}$ 关系曲线

在廊道互通时, 由于廊道 2 回流量发生较早, 此时 t_{de} 略小于不互通时。仅省水阀门提前时, $t_{be} = 25\text{ s}$ 、 $t_{de} = 0\text{ s}$ 时, $e = 0.12\text{ m}$ 、 $h_b = 1.72\text{ m}$, 通过式(9)计算得 $E_b = 31.89\%$ 。如阀门双提前, $t_{be} = 25\text{ s}$ 、 $t_{de} = 54\text{ s}$ 、 $h_b = 1.71\text{ m}$, 残余剩余水头 $e \approx 0\text{ m}$, 宜按式(8)计算得 $E_b = 31.69\%$ 。由此可见, 闸首阀门控制在最优提前量以内时, 对省水率的影响极小, 可接单提前公式估算省水率, 同

时廊道互通的影响可忽略不计。

闸首阀门提前 t_{de} 对闸首输水时间 T_d 影响不大, $\Delta T_d \approx 0$, 但交叉启闭可节省输水时间 $\Delta T \approx nt_{de}$, 因此双提前可节省时间 $\Delta T \approx n(t_{be} + t_{de})$ 。启闭机械液压系统从开启到关闭宜有过渡时间, 金家堰船闸省水阀门可取停顿 10 s, 提前关闭 15 s, 在此基础上, 闸首阀门提前开启 30 s, 输水时间 614 s, 缩短约 43 s, 省水率 32.76%, 仅降低 0.57%。

4 结论

1) 一般情况下, 阀门开启速度是由船舶停泊条件决定, 在启闭机械性能允许时, 应尽量提高省水阀门关闭速度。省水阀门提前关闭时间 t_{be} 与其剩余水头开方 \sqrt{e} 成线性关系, 省水廊道不产生回流的闸首最优提前开启时间 t_{de} 又与不提前开启的 \sqrt{e} 成线性关系。小量的剩余水头 e 是阀门交叉启闭的前提, 双提前可有效节省输水时间。

2) 常用的省水率计算公式适用阀门不提前或单提前的情况, 闸首阀门不超过最优提前时间时, 对省水率的影响极小, 可按常用公式估算省水率。

3) 金家堰船闸在交叉启闭期存在上游水体直接输入省水池或者省水池水体直接泄到下游的可能性。设计采用的廊道布置使得两者直通输水时阻力系数较大, 有效限制了回流量, 闸首阀门提前时间小于 2 倍省水阀门提前时间时, 廊道互通的影响可忽略不计。

参考文献:

- [1] 吴澎, 曹凤帅. 西江长洲水利枢纽 3 号和 4 号船闸总体设计[J]. 港工技术, 2014, 51(5): 4-9.
- [2] PHILIPPE R. Innovations in navigation lock design[R]. Brussels: PIANC, 2009.
- [3] 吴澎, 曹凤帅. 省水船闸建设技术和进展[C]//中国工程院. 中国科技论坛: 水安全与水利水电可持续发展. 北京: 高等教育出版社, 2014: 188-192.
- [4] 杨裔轩, 黄秀章. 郑家岗省水船闸输水系统水力学试验[J]. 水利水运科学研究, 1980(1): 83-86.
- [5] 杨裔轩. 省水船闸的水力计算[J]. 水运工程, 1985(12): 20-22.