

设置消能竖井的船闸输水系统水力计算数学模型

李君^{1,2,3}, 洪娟⁴, 李中华^{1,2,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 设置竖井式内消能工的船闸输水系统的充水过程由于消能竖井的影响而存在不连续水流, 因此其水力计算有别于常规船闸输水系统. 本文根据船闸输水系统水力计算的一般原理, 建立了该型式输水系统水力计算的数学模型, 给出了其相关水力特征值的计算方法. 结合乌江银盘船闸设置竖井式内消能工输水系统方案进行了水力计算, 通过物理模型试验成果验证了数学模型的合理性, 并根据计算结果对该型式输水系统的水力特性进行了初步分析, 认为该型式输水系统可有效减小进入闸室的水流能量.

关键词: 竖井式内消能工; 船闸输水系统; 水力计算; 数学模型

中图分类号: U641.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2010)02-0073-06

国内外大量模型试验与原型观测成果表明, 输水阀门的工作条件及闸室内的消能问题是(超)高水头船闸所需解决的主要关键技术问题^[1]. 目前世界船闸的研究水平和技术措施可基本解决40 m左右水头单级船闸的水力学关键问题, 但要满足我国中西部地区高坝通航的要求, 建设50 m以上水头的单级船闸(含多级船闸的中间级), 采用现有输水系统型式将难以满足阀门工作条件, 闸室输水廊道布置也将更为复杂, 因此必须考虑新的输水系统布置型式.

若将水工泄洪隧洞中的内消能理念^[2]应用于船闸输水系统之中, 利用内消能工降低输水廊道内的水流流速或直接承受部分水头, 都将明显改善输水阀门的工作条件并减小进入闸室内的水流能量. 南京水利科学研究院曾结合三峡船闸双线三级船闸布置方案分别进行了设两道输水阀门有、无中间消能室方案的水力学试验研究, 认为此方案可行但在实际运用中阀门控制较复杂且存在安全隐患^[3]; 前苏联在乌斯基-卡米诺阿尔斯基船闸中采用了将水泄至中间贮水池的办法将水头分级, 但实际运行中有大量气体进入闸室并影响了船舶停泊安全^[4]; 我国四川、湖南丘陵地区有许多小型船闸采用了上闸首短廊道垂直竖井的输水型式, 但其适应的工作水头均较小^[5]. 笔者在对各种常见内消能工在船闸输水系统中的适用性进行分析后, 提出了型式最为简单的竖井式内消能工(见图1)^[6], 并对其进行了试验研究. 研究成果表明, 竖井式内消能工的设置将明显改善输水阀门的工作条件, 因而可简化输水阀门段廊道体型和输水阀门结构及与其相关的吊杆结构和启闭系统; 同时还可有效减小进入闸室的水流能量, 从而使闸室内的输水系统型式得以简化^[7].

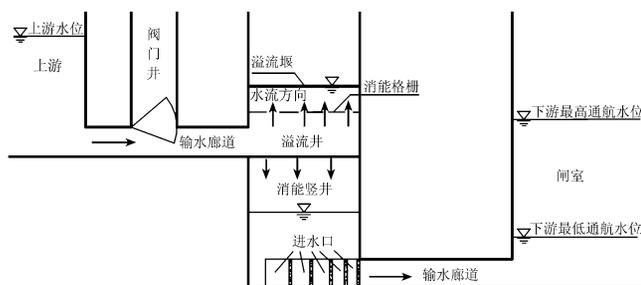


图1 设置竖井式内消能工的船闸输水系统概化图
Fig. 1 The filling and emptying system with drop shaft interior energy dissipater

收稿日期: 2009-05-10

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目“西部超高水头枢纽通航建筑物关键技术研究”(2004 328 746 37)

作者简介: 李君(1982-), 男, 甘肃兰州人, 助理工程师, 硕士, 主要从事通航建筑物水力学研究. E-mail: lijun@nhri.cn

1 设置竖井式内消能工的船闸输水系统充水过程分析

对于设置竖井式内消能工的船闸输水系统,由于消能竖井的影响,充水时在溢流井被淹没前水流不再连续,但溢流井上游及消能竖井下游的输水廊道中仍为连续水流,因此其充水过程可分解为上游向消能竖井输水(下称第一级输水)和消能竖井向闸室输水(下称第二级输水)两个过程.对于第二级输水,由于竖井下游廊道阻力影响,消能竖井内的水位在整个输水过程中始终高于闸室水位,且其差值随第一级输水流量的变化而变化,但流量系数保持不变,因此第二级输水可看作变水头恒流量系数的输水过程.而其第一级输水则根据内消能工尺寸及阀门开启速度的不同,将会出现变水头变流量系数、恒水头变流量系数、变水头恒流量系数、恒水头恒流量系数等多种输水工况.

由上述分析可知,设置竖井式内消能工的船闸输水系统输水过程比常规输水系统复杂许多,原有的常规输水系统水力计算方法^[8]已不能适用,因此须根据其输水特性建立新的水力计算数学模型,从而为计算及分析设置竖井式内消能工的船闸输水系统的水力特性提供依据.

2 水力计算数学模型

2.1 基本方程

设置竖井式内消能工的船闸输水系统充水过程可概化为图2所示的一维非恒定流体力学问题.图中, h_{1t} , h_{2t} 和 h_{0t} 分别为上闸室、下闸室和消能竖井在 t 时刻的水位, H_{0t} 为消能竖井与下闸室水位差; dh_{1t} , dh_{2t} 和 dh_{0t} 分别为上闸室、下闸室和消能竖井在 dt 时段内的水位变化值; h_y 为溢流井水位; H_1 , H_2 分别为内消能工将船闸工作水头分成的上、下两级水头; Q_{1t} , Q_{2t} 分别为竖井上游及下游廊道内的水流流量, v_{1t} , v_{2t} 分别为对应的水流流速; Ω_1 , Ω_2 和 Ω_0 分别为上闸室、下闸室和消能竖井的水域面积,而 ω_1 , ω_2 分别为输水阀门处廊道断面及下游主廊道断面面积; l_{np1} , l_{np2} 分别为竖井上游和下游廊道的换算长度; ζ_1 , ζ_2 分别为竖井上游廊道(阀门全开,包括进、出口)相对于输水阀门处廊道断面和下游廊道(包括进、出口)对于主廊道断面的阻力系数.

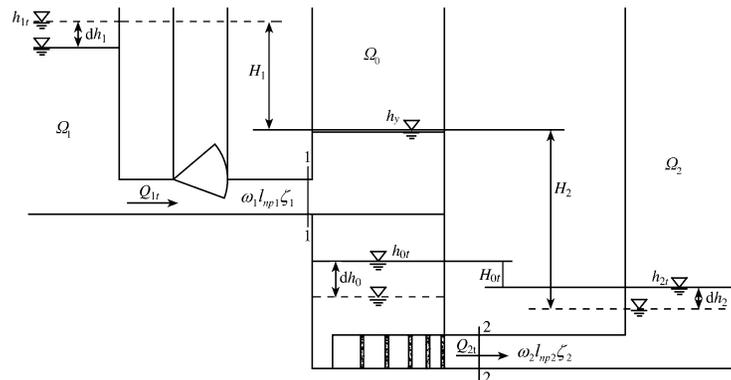


图2 设置竖井式内消能工的船闸输水系统水力计算概化图

Fig.2 Hydraulic calculation of the filling and emptying system with drop shaft interior energy dissipater

根据水量平衡原理和能量守恒原理^[9],并考虑到设置竖井式内消能工的船闸输水系统的输水特性及水流的惯性作用,可得到下列一般形式的非恒定流方程组:

$$\begin{cases} h_{1t} - h_{0t} = \frac{1}{\mu_{1t}^2} \frac{Q_{1t}^2}{2g\omega_1^2} + \frac{l_{np1}}{g\omega_1} \frac{dQ_{1t}}{dt} & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_{0t} - h_{2t} = \frac{1}{\mu_{2t}^2} \frac{Q_{2t}^2}{2g\omega_2^2} + \frac{l_{np2}}{g\omega_2} \frac{dQ_{2t}}{dt} & (2) \end{cases}$$

$$Q_{1t} dt - Q_{2t} dt = \Omega_0 dh_0 \quad (3)$$

$$Q_{2t} dt = \Omega_2 dh_2 \quad (4)$$

对于单级船闸充水,式(1)中的 h_{1t} 保持不变,等于上游水位 h_u .在竖井水位尚未达到溢流堰顶前,式(1)中的 h_{0t} 应用 h_y 代替,即当 $h_{0t} < h_y$ 时,有 $h_{1t} - h_{0t} = h_u - h_y = H_1$,而此时式(2)中的 h_{0t} 仍为消能竖井内的水位;而当溢流井被淹没后,式(1)和式(2)中的 h_{0t} 均表示消能竖井内的水位.式(1)中的 μ_{1t} 为竖井上游廊道在 t 时刻的流量系数:

$$\mu_{1t} = 1 / \sqrt{\zeta_{1t}} \quad (5)$$

式中: ζ_{1t} 为 t 时刻竖井上游廊道的总阻力系数, $\zeta_{1t} = \zeta_1 + \zeta_n$, ζ_n 表示阀门开度为 n 时阀门的阻力系数,可按规范查表^[10]得到;阀门全开后, μ_{1t} 即为恒定值 μ_1 , $\mu_1 = 1 / \sqrt{\zeta_1}$.对于竖井下游廊道,其流量系数在充水过程中保持不变,即 $\mu_{2t} = \mu_2 = 1 / \sqrt{\zeta_2}$.

2.2 差分格式

可以看出,式(1)~(4)为非线性变系数的常微分方程组,难以得到上述方程组的解析解.为此,将其改写为有限差分格式,用数值积分以获得其数值解^[11].设下标 n 表示各物理量的目前状态值, $n+1$ 表示下一步计算中各物理量的预测值,经整理可得上述微分方程组的差分格式为:

$$aQ_{1,n+1}^2 + bQ_{1,n+1} + c = 0 \quad (6)$$

$$Q_{2,n+1} = (Q_{1,n+1} + Q_{1,n}) - \frac{2\Omega_0}{\Delta t}(h_{0,n+1} - h_{0,n}) - Q_{2,n} \quad (7)$$

$$h_{2,n+1} = \frac{\Delta t}{2\Omega_2}(Q_{2,n+1} + Q_{2,n}) + h_{2,n} \quad (8)$$

$$h_{0,n+1} = \frac{1}{2g\mu_2^2\omega_2^2Q_{2,n+1}^2} + \frac{l_{np2}}{g\omega_2\Delta t}(Q_{2,n+1} - Q_{2,n}) + h_{2,n+1} \quad (9)$$

其中:

$$a = \frac{1}{\mu_{1,n+1}^2 2g\omega_1^2} \quad (10)$$

$$b = \frac{l_{np1}}{g\omega_1\Delta t} \quad (11)$$

$$c = -\frac{l_{np1}}{g\omega_1\Delta t}Q_{1,n} - (h_u - h'_{0,n+1}) \quad (12)$$

计算时,先假设 $h'_{0,n+1}$ 为某一值,当 $h'_{0,n+1} < h_y$ 时,式(12)中 $h_u - h'_{0,n+1}$ 用 H_1 代替,则可先由式(10)~(12)计算出系数 a, b, c 的值,再依次按式(6)~(9)即可计算出 $h_{0,n+1}$ 的值.如果 $|h_{0,n+1} - h'_{0,n+1}| \leq \varepsilon$ (计算允许误差,一般取0.01 m),则可进行下一步迭代;若 $|h_{0,n+1} - h'_{0,n+1}| > \varepsilon$,则应采用新的估计值 $h'_{0,n+1}$ 继续试算,直至满足精度为止.

2.3 充水水力特征值

2.3.1 水位流量过程 通过前述迭代计算,即可得出消能竖井上游廊道、下游主廊道内的流量过程,以及消能竖井和闸室内的水位过程.

2.3.2 充水时间 充水时间为闸室水位与上游水位的齐平时间.

$$T = t_j; \quad |h_{0,j} - h_u| < \varepsilon_h \quad (13)$$

式中: ε_h 为允许误差,一般取0.01 m.

2.3.3 输水廊道及溢流井内断面平均流速、闸室及消能竖井水位断面平均上升速度 两种流速均可由流量过程计算得出,即:

$$v_{i,n} = Q_{1,n} / \omega_i \quad (14)$$

$$v_{j,n} = Q_{2,n} / \omega_j \quad (15)$$

$$v_{z,n} = Q_{2,n} / \Omega_2 \quad (16)$$

$$v_{x,n} = (Q_{1,n} - Q_{2,n}) / \Omega_0 \quad (17)$$

式中: $v_{i,n}$ 为消能竖井上游第 i 段廊道(断面面积为 ω_i)断面的平均流速(m/s); $v_{j,n}$ 为消能竖井下游第 j 段廊道

(断面面积为 ω_j) 断面的平均流速 (m/s); $v_{z,n}$ 为闸室内水面断面平均上升速度 (m/s); $v_{x,n}$ 为消能竖井内水面断面平均上升速度 (m/s).

2.3.4 水 流 能 量 由于消能竖井的引入,使得输水过程中水流由不连续流向连续流转变,因此,在计算能量时应按不同时刻、不同位置进行计算.以 E_n 及 E_{nx} 分别表示 n 时刻理论上总体所具有的能量及消能竖井内水流所具有的能量(单位为 kW),则上述能量可由式(18)和(19)计算:

$$E_n = 9.81 Q_{1,n} (h_u - h_{2,n}) \quad (18)$$

$$E_{nx} = (Q_{1,n} - Q_{2,n}) \left[\frac{1}{2} m_{xn} v_{x,n}^2 + 9.81 (h_{0,n} - h_{2,n}) \right] \quad (19)$$

式中: m_{xn} 为动能校正系数,计算时可取为1.

2.3.5 内消能工消能率 如图2,上游竖井进口1-1断面和下游竖井出口2-2断面 n 时刻的能量分别为

$$E_{n1} = Q_{1,n} \left[\frac{1}{2} m_{yn} v_{y,n}^2 + \frac{1}{2} m_{1n} \zeta_1'' v_{1,n}^2 + 9.81 (h_y - h_{2n}) \right] \quad (20)$$

$$E_{n2} = Q_{2,n} \left[\frac{1}{2} m_{zn} v_{z,n}^2 + \frac{1}{2} m_{2n} \zeta_2'' v_{2,n}^2 \right] \quad (21)$$

式中: ζ_1'' 、 ζ_2'' 分别为1-1断面后上游廊道和2-2断面后下游廊道的阻力系数; m_{yn} 、 m_{1n} 、 m_{2n} 均为动能校正系数,计算时可取为1. $v_{y,n}$ 、 $v_{1,n}$ 、 $v_{2,n}$ 分别为溢流井断面竖向平均流速及1-1、2-2断面平均流速.当溢流井被淹没后,即 $h_{0i} > h_y$ 时,式(20)中 h_y 用 $h_{0,n}$ 代替.则 n 时刻内消能工的消能率 η 可定义为:

$$\eta = \frac{E_{n2} - E_{n1}}{E_n} \times 100\% \quad (22)$$

3 算 例

以乌江银盘单级船闸为例,其闸室尺寸为120.0 m×12.0 m×3.0 m(长×宽×门槛水深),设计消能竖井横截面积为275 m²,溢流堰顶高程为194.10 m.计算工况为双边阀门连续开启充水过程,阀门开启时间分别采用2 min和6 min,选取的水位组合为217.00~178.54 m(水头38.46 m,其中 $H_1=20.90$ m).其余计算参数见表1.

表1 水力计算参数

Tab.1 Parameters of hydraulic calculation

输水系统	计算断面	计算断面面积/m ²	阻力系数	流量系数	换算长度/m	典型断面后廊道阻力系数
竖井上游廊道	阀门处廊道断面	11.44	1.517	0.812	37	1.240(1-1断面后)
竖井下游廊道	闸墙主廊道断面	14.52	2.695	0.609	117	1.829(2-2断面后)

计算所得的水力特征值、物理模型试验值^[7]及其之间的比较分别见表2及图3.由图表可知:

(1)数学模型计算所得的水位、流量过程与物理模型试验成果基本一致,但计算所得的充水时间比模型试验值偏小,其原因主要有两方面:一是实际过程中溢流井被淹没后,水流由自由出流转变为淹没出流,其流量系数受淹没的影响应比未淹没时要小,而建立数学模型时未考虑淹没的影响;二是物理模型中存在漏水现象,导致实际输水体积增大.按表2中的结果得到数学模型与物理模型输水时间的误差约为8%,若考虑淹没及模型漏水的影响,则误差可控制在5%以内.

(2)数学模型计算所得输水系统总能量及竖井出口(9#测点)断面数学模型与物理模型试验结果基本一致.而竖井入口(6#测点)断面能量值在0.2~0.7开度之间两者的误差较大,主要原因是由于此时段中竖井入口断面处于门后水流漩滚区,水流属于急变流范围,而计算其能量时则采用的是应用于渐变流的能量方程,由此导致在上述时段内所计算的内消能工消能率亦有较大误差.充水中期计算值与试验值吻合较好,而充水末期由于各典型断面能量均较小,此时考虑内消能工的消能率意义不大,其误差主要受各断面能量的计

算精度影响.

(3) 充水初期,由于下游廊道的阻力作用,消能竖井内水位迅速升高,竖井与闸室的水位差逐渐增大直至溢流井被淹没时达到最大.上游廊道流量最大值发生溢流井被淹没前,下游廊道流量最大值发生的时间由于阻力的影响而比上游廊道稍有延迟.

(4) 输水系统的大部分能量消耗在内消能工范围内.随着阀门逐渐开启,内消能工的消能率由40%逐渐增大,到阀门全开附近消能率增至最大,且阀门开启时间越短,消能率越高;随后,内消能工的消能率逐渐减小至一稳定值,而这一稳定值与阀门开启速度无关,约为60%.

表2 水力特性数模计算结果与物模试验结果比较

Tab.2 Comparison between the calculated and experimental results of the hydraulic characteristics

模型类型	阀门开启时间/min	输水时间/s	上游廊道最大流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	下游廊道最大流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	竖井与闸室最大水位差/m	内消能工最大消能率/%	内消能工稳定消能率/%
数学模型	2	791	189.01	148.78	14.45	70.56	60.58
	6	899	154.72	130.47	11.11	62.55	60.55
物理模型	2	860	186.78	146.98	15.05	77.37	60.54

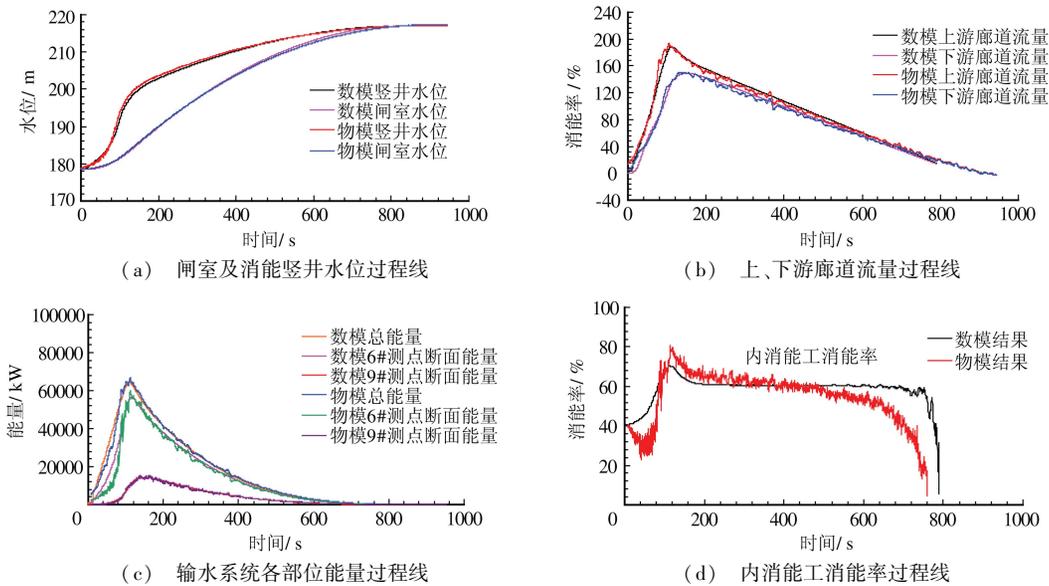


图3 水力特性计算结果与物理模型试验结果比较($H=38.46\text{ m}, t_v=2\text{ min}$)

Fig.3 Comparison between the calculated and experimental results of the hydraulic characteristics ($H=38.46\text{ m}, t_v=2\text{ min}$)

4 结 语

设置内消能工的船闸输水系统是一种新型的输水系统布置型式,能够较好地解决我国西部河流水位变幅大、通航建筑物工作水头高等带来的技术难题.由于消能竖井的设置,输水系统中存在不连续水流,因此其水力计算不同于一般的船闸输水系统.

本文根据设置竖井式内消能工输水系统的输水特性,建立了水力计算数学模型.结合乌江银盘船闸进行了水力计算,并将计算结果与物理模型试验成果进行了对比,验证了数学模型的合理性及可靠性.同时根据计算结果对此种型式输水系统的水力特性进行了初步分析,认为该型式输水系统可有效减小进入闸室的水流能量,有利于改善船闸闸室内的水流条件.

参 考 文 献:

- [1] 须清华, 张瑞凯. 通航建筑物应用基础研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (XU Qing-hua, ZHANG Rui-kai. Fundamental study on application of navigation structures[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 郑林平, 李岳军. 水工隧洞内消能工的研究及应用进展[J]. 水力发电, 2006(9): 81-83. (ZHENG Lin-ping, LI Yue-jun. Study and application development of interior energy dissipater in hydraulic tunnel[J]. Water Power, 2006(9): 81-83. (in Chinese))
- [3] 南京水利科学研究院. 三峡船闸水力学试验报告——150 m水位双线三级两道阀门方案[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1987. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Hydraulic experiment report of the double-line three-step double-valve plan under 150 m water level for the TGP lock[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1987. (in Chinese))
- [4] 杨立信. 苏联高水头船闸建设及科研概况[J]. 水运工程, 1986(2): 21-25. (YANG Li-xin. Summary of high head lock's construction and research in Soviet Union[J]. Port & Waterway Engineering, 1986(2): 21-25. (in Chinese))
- [5] 周华兴. 船闸竖井短廊道输水系统的合理布置[J]. 水道港口, 1980(4): 38-43. (ZHOU Hua-xing. Rational layout for the drop-shaft short-culvert filling and emptying system[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1980(4): 38-43. (in Chinese))
- [6] 李君, 张瑞凯, 宣国祥. 内消能工在船闸输水系统中的应用分析[J]. 水利水运工程学报, 2007(3): 40-46. (LI Jun, ZHANG Rui-kai, XUAN Guo-xiang. Application of interior energy dissipater in the filling and emptying system of navigation locks[J]. Hydro-Science and Engineering, 2007(3): 40-46. (in Chinese))
- [7] 李君. 内消能工在船闸输水系统中的应用研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (LI Jun. Study on application of interior energy dissipater in filling and emptying system of navigation locks[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [8] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (WANG Zuo-gao. Navigation lock design[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1992. (in Chinese))
- [9] 董曾南. 水力学上册(第四版)[M]. 高等教育出版社, 1995. (DONG Zeng-nan. Hydraulics(4th Edition)[M]. Higher Education Press, 1995. (in Chinese))
- [10] JTJ306-2001, 船闸输水系统设计规范[S]. (JTJ306-2001, Design code for filling and emptying system of shiplocks[S]. (in Chinese))
- [11] 汪德瑾. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. (WANG De-guan. Theory and application of computational hydraulics[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1989. (in Chinese))

A mathematical model for hydraulic calculation of the navigation locks' filling and emptying system with drop shaft interior energy dissipater

LI Jun^{1,2,3}, HONG Juan⁴, LI Zhong-hua^{1,2,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Navigation Structures Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 4. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Due to the drop shaft, discontinuous flow exists in the filling process of the filling and emptying system (FES) with drop shaft interior dissipater, which results in the difference in the hydraulic calculation from the normal FES. According to the basic principles of the hydraulic calculation of navigation locks' FES, a mathematical model for this new FES is established and the computational methods of its related hydraulic characteristics are also put forward. The hydraulic characteristics of this new FES for Yinpan lock are calculated, and the rationality of the model is validated by comparing the calculated and experimental results. The calculated results indicate that this new FES can effectively reduce the flow energy into the lock chamber.

Key words: drop shaft interior energy dissipater; filling and emptying system of navigation lock; hydraulic calculation; mathematical model