



# 闸墙长廊道侧支孔输水系统 出流均匀性分析与布置优化

丁乐雨, 李中华, 安建峰, 张首元, 梅铃钦

(南京水利科学研究院, 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:** 针对船闸分散式输水系统前后段支孔出流流量及出流时间不同的问题, 依托国内某已建船闸, 建立数学模型, 通过计算数据与实测资料的耦合, 验证模型适用性。在模型基础上修改支孔面积, 模拟不同支孔面积比下各支孔的出流量, 并利用方差和均匀性系数评价不同工况的出流均匀性。结果表明: 1) 支孔出流量前端支孔出流较早, 输水中期和后期的流量较小; 末端支孔出流较晚, 但由于管道末端的压力较大, 输水中期和后期的流量较大。2) 支孔出流均匀性随前后支孔面积比的增大呈现先提高后降低的趋势。3) 本工程前后支孔面积比情况良好。

**关键词:** 船闸; 分散式输水系统; 侧支孔出流; 均匀性

中图分类号: U64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0130-06

## Flow uniformity and arrangement optimization for side-branch discharge holes in dam wall long corridor channel water conveyance system

DING Leyu, LI Zhonghua, AN Jianfeng, ZHANG Shouyuan, MEI Lingqin

(Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport,  
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Regarding the issue of disparate flow rates and discharge times between the upstream and downstream lateral openings of a distributed water conveyance system in a ship lock, this study relies on a mathematical model constructed based on an existing domestic ship lock. By coupling computational data with measured data, the suitability of the model is validated. The model is further modified to simulate the discharge rates of different lateral openings by adjusting their respective areas, and the discharge uniformity under various operating conditions is evaluated using variance and uniformity coefficients. The research results show that: 1) The upstream lateral openings discharge earlier, resulting in lower flow rates during the mid and late stages of water conveyance, while the downstream lateral openings discharge later but experience higher flow rates during the mid and late stages due to greater pressure at the end of the pipeline. 2) The discharge uniformity exhibits an initial improvement followed by a decline with an increase in the area ratio between the upstream and downstream lateral openings. 3) The area ratio of the lateral openings in the practical engineering project represents a relatively favorable scenario.

**Keywords:** ship lock; decentralized water conveyance system; lateral orifice discharge; uniformity

输水系统是船闸灌泄水的主要设备, 其水力性能直接影响闸室输水效率和船舶停泊安全。船

闸输水系统布置形式众多, 按闸室输水方式可划分为集中输水系统和分散输水系统两种形式<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2023-09-04

作者简介: 丁乐雨 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事通航水力学研究。

通讯作者: 李中华 (1974—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事通航建筑物模型试验及数值模拟研究。

E-mail: zhli@nhri.cn

闸墙长廊道侧支孔输水系统(图1)是典型的简单式分散输水系统,主要通过布置在闸墙长廊道中部的一系列短支管或支孔向闸室供水,具有布置简单、造价较低的优点,在国内外中低水头船闸中应用十分广泛。但是,由于廊道水体惯性的影响,此类输水系统在充泄过程中出水支孔流量沿纵向分布不均,使得闸室内仍有一定的水面比降,导致船舶承受较大的波浪力作用<sup>[2]</sup>。同时,

布置在闸墙上的侧向出水支孔出流能量较为集中,闸室船舶还受到较大的局部水流作用力。因此,闸墙长廊道侧支孔输水系统所适应的水力指标往往较低。实际上,此类输水系统主要通过两侧闸墙廊道出水支孔交错布置方式实现闸室横向均匀出流,而支孔出流流量纵向分布的均匀性则主要通过沿程不同区段的出水支孔面积变化加以调节<sup>[3]</sup>。

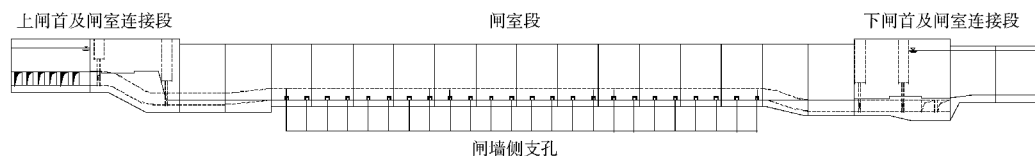


图1 闸墙长廊道侧支孔输水系统

由于管道输水的水力学特性,长廊道分散式输水系统的船闸充泄水过程中存在惯性水头<sup>[4]</sup>,廊道输水前后支孔出流量产生差异,具体表现为前端支孔出流早,输水中、后期流量小;末端支孔出流晚,但由于管道末端压力大,输水中、后期流量大。在分散式输水系统的研究中,Stockstill等<sup>[5]</sup>开发了一套水力计算程序用于计算船闸分散式输水系统多支孔出流的射流流量及压力分布情况。卜美飞等<sup>[6]</sup>通过正态水工整体模型方法对碾盘山船闸输水系统模型进行试验研究,结果验证了分散式输水系统在碾盘山船闸布置的合理性。傅陆志丹等<sup>[7]</sup>通过原型观测的方法对犍为船闸335 m库水位分散式输水系统水力特性进行调试研究,提出优化方案,有效缓解了闸室超灌(泄)现象。张庆亮等<sup>[8]</sup>通过数值模拟的方法对某闸底长廊道输水系统船闸建立三维数学模型,模拟非恒定流作用下船闸充水过程,分析闸室流速、流态。

在各项研究中均发现分散式输水系统各支孔出流时间、流速、流量不同<sup>[9]</sup>,针对此问题,李云等<sup>[10]</sup>提出通过改变前后段支孔面积大小来保证出流均匀的方案。总体而言,国内外专家学者关于闸墙长廊道侧支孔输水系统布置、闸室输水水力特性和船舶停泊条件的相关研究较多,我国采用此类输水系统的船闸首末段侧支孔面积比基本均为1.2:1~2.0:1,但是出水支孔不同区段的面积

变化对出流均匀性的影响研究成果相对较少,且合理面积比尚无明确结论。因此,本文针对闸墙长廊道侧支孔输水系统出水支孔流量沿纵向分布不均的问题,通过数值模拟方法,以国内某实际船闸为依托,参考船闸长廊道分散输水系统研究<sup>[11]</sup>,建立模型模拟各支孔出流流量,分析不同前后段支孔面积比下的出流均匀性。

## 1 典型输水系统布置

闸墙长廊道侧支孔输水系统是一种简单型分散式输水系统,特点为在闸墙长廊道的中段直接设置一系列短支孔向闸室直接供水,此形式使支孔射出的水流在闸室内自由扩散消能,因此适用于中低水头的船闸。其优点包括布置简便、成本较低、显著减少基础挖掘工作以及节省水下施工的成本。

本文依托尺寸为280 m×34 m×4.5 m(长×宽×门槛水深)的船闸工程,采用闸墙长廊道侧支孔输水系统形式,共布置24×2个侧支孔。由于输水廊道末端压力较大,因此末段支孔面积设计时小于首段支孔面积,首段16个支孔尺寸为0.90 m×1.25 m(宽×高),中段16个支孔尺寸为0.75 m×1.25 m,末段16个支孔尺寸为0.60 m×1.25 m,首段末段支孔面积比为1.5:1。阀门为面积20.16 m<sup>2</sup>的平板门,上游水位高程40.2 m,下游水位高程26.23 m,闸室出水段布置见图2。

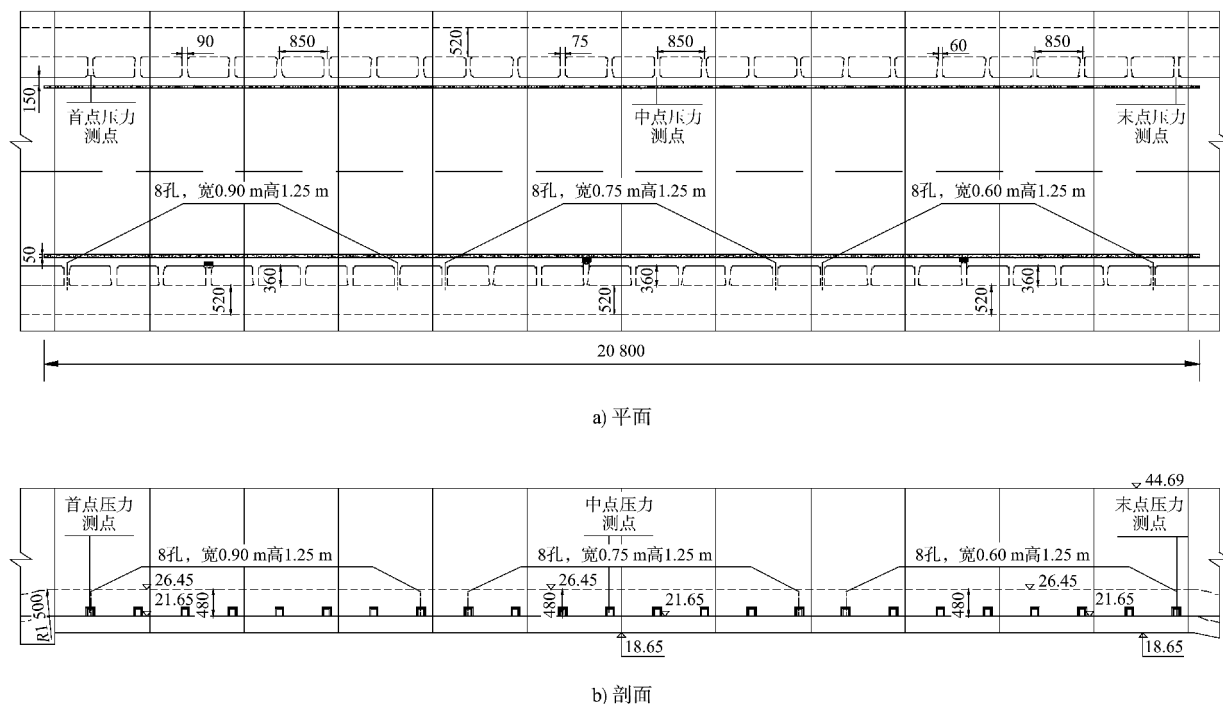


图2 闸室出水段布置 (尺寸: mm; 高程: m)

## 2 输水水力特性计算模型及验证

### 2.1 控制方程及求解方法

基于管道一维非恒定流基本方程进行船闸输水系统水力计算, 短廊道输水由于管道惯性水头项较小, 可以忽略不计。对于长廊道分散输水系统, 由于其惯性水头项较大, 因此在计算中必须考虑。根据 Bernoulli 方程, 得出包含船闸闸室输水过程的非恒定流方程组:

$$H_t = \sum_{i=1}^m \xi_i \frac{v_i^2}{2g} + \frac{1}{g} \sum_{i=1}^m l_i \frac{dv_i}{dt} \quad (1)$$

$$Q_t = -A \frac{dH_t}{dt} \quad (2)$$

式中:  $H_t$  为瞬时  $t$  时刻的水位差, m;  $\xi_i$  为阀前、阀后阻力系数;  $l_i$  为第  $i$  段惯性长度;  $v_i$  为第  $i$  段输水廊道流速, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $A$  为闸室面积, m<sup>2</sup>;  $Q_t$  为瞬时  $t$  时刻的闸室流出流量, m<sup>3</sup>/s。

为计算支孔流量, 得出任一支孔与下一支孔的非恒定流能量方程:

$$\frac{P_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} = Z + \xi_i \frac{u_i^2}{2g} \quad (3)$$

$$\frac{P_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} = Z + \xi_{i+1} \frac{u_{i+1}^2}{2g} + \frac{L_{i+1}}{g} \frac{dv_{i+1}}{dt} + \xi_{i+1} \frac{v_{i+1}^2}{2g} \quad (4)$$

联立得:

$$\xi_i \frac{u_i^2}{2g} = \xi_{i+1} \frac{u_{i+1}^2}{2g} + \frac{L_{i+1}}{g} \frac{dv_{i+1}}{dt} + \xi_{i+1} \frac{v_{i+1}^2}{2g} \quad (5)$$

$$q_i^2 = \frac{\xi_{i+1}}{\xi_i} q_{i+1}^2 + \frac{\xi_{i+1} \omega_i^2}{\xi_i S^2} Q_{i+1}^2 + \frac{2\omega^2 L_{i+1} dQ_{i+1}}{S \xi_i dt} \quad (6)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  个支孔口的压力, Pa;  $v_i$  为第  $i$  段廊道的流速, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $Z$  为水位高程, m;  $\rho$  为液体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $u_i$  为第  $i$  个支孔口的流速, m/s;  $L_i$  为第  $i$  段廊道的长度, m;  $S$  为廊道面积, m<sup>2</sup>;  $\omega_i$  为第  $i$  个支孔面积, m<sup>2</sup>;  $\omega$  为阀门处廊道断面面积, m<sup>2</sup>;  $Q_i$  为第  $i$  段廊道流量, m<sup>3</sup>/s;  $q_i$  为第  $i$  个支孔口的流量。

根据实际尺寸计算惯性长度, 建立一维非恒定流数学模型, 输水廊道的换算长度  $L_p$  由公式(7)确定:

$$L_p = \sum_{i=1}^m \frac{\omega}{\omega_i} l_i \quad (7)$$

通过微分方程迭代方法, 求得不同阀门速度下的闸室水位变化及输水流量变化过程, 从而比较各出水支孔的出流流量。

### 2.2 模型率定及验证

针对本典型工程案例, 模拟输水过程。模型试

验成果表明,该工程输水廊道惯性长度 286.33 m,其余各部分换算长度见表 1,模型采用与物模相同的参数对比分析船闸输水水位及流量变化过程。阀门开启时间为 8 min,不动水关阀。

表 1 输水系统各部位特征尺寸

名称	尺寸/ (m×m)	数量/ 个	面积/ m <sup>2</sup>	与阀门段 廊道面积 之比
闸室(长×宽)	280×34	1	9 520	—
首段支孔(宽×高)	0.90×1.25	16	18	0.446
中段支孔(宽×高)	0.75×1.25	16	15	0.372
末段支孔(宽×高)	0.60×1.25	16	12	0.297
上游进水口(宽×高)	4.2×5.5	2	46.2	1.145
阀门段廊道(宽×高)	4.2×4.8	2	40.32	1.000
支孔间廊道(宽×高)	5.2×4.8	2	49.92	1.238

注:上游水位高程 40.21 m,闸室水位高程 27.45 m。

对前后段支孔面积比为 1.5 的实测工况进行数学模拟验证。使用相关系数  $R^2$  和纳什效率系数  $E$  评价数学模型反映实际情况的精确度<sup>[12]</sup>。评价公式如下:

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (H_{m,i} - \bar{H}_m)(H_{s,i} - \bar{H}_s) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (H_{m,i} - \bar{H}_m)^2 \sum_{i=1}^n (H_{s,i} - \bar{H}_s)^2} \quad (8)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{m,i} - H_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{m,i} - \bar{H}_m)^2} \quad (9)$$

式中:  $H_{m,i}$  为实测资料观测数据,  $H_{s,i}$  为数学模型计算数据,  $\bar{H}_m$  为实测资料观测数据的平均值,  $\bar{H}_s$  为数学模型模拟数据的平均值。

实测及模拟流量过程见图 3,实测峰值流量出现在第 454 s,峰值流量为 346.7 m<sup>3</sup>/s;模拟输水流量峰值出现在第 447 s,峰值流量为 339.9 m<sup>3</sup>/s,实测与模拟峰值流量误差为 1.96%,相关系数  $R^2=0.9986$ ,  $E=0.9967$ ,流量过程拟合较好。

首段、中段、末段测点廊道压力高程见图 4,首点模拟压力与实测压力最大差值为 0.28 m,最大误差为 0.71%,相关系数  $R^2=0.9995$ ,  $E=0.9980$ ;中点模拟压力与实测压力最大差值为 0.32 m,最大误差为 0.81%,相关系数  $R^2=0.9996$ ,  $E=0.9975$ ;

末点模拟压力与实测压力最大差值为 0.29 m,最大误差为 0.99%,相关系数  $R^2=0.9998$ ,  $E=0.9990$ 。压力过程线拟合程度较好。

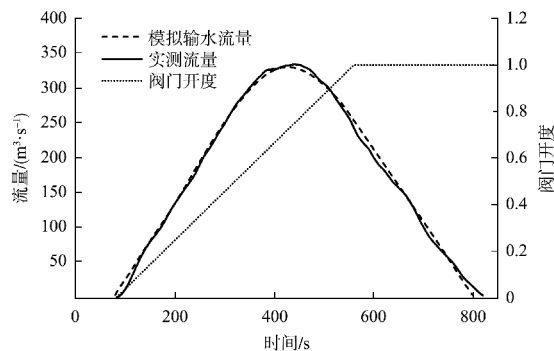
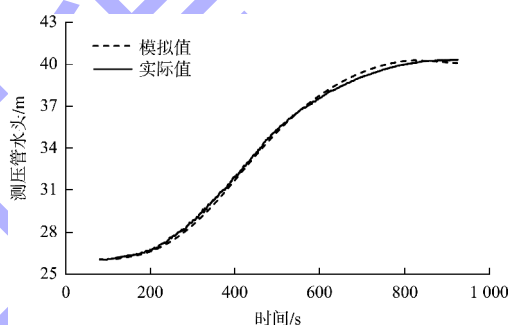
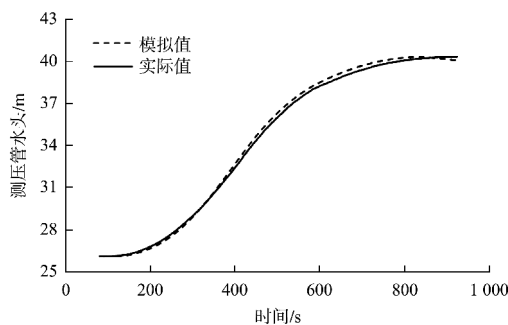


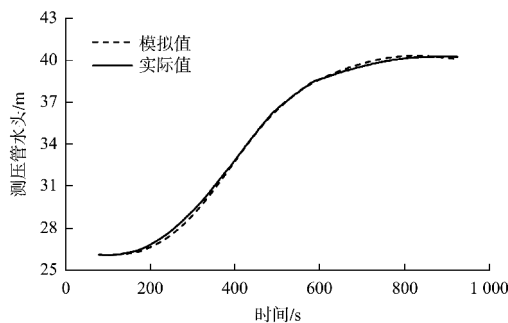
图 3 实测及模拟流量过程拟合



a) 首点



b) 中点



c) 末点

图 4 模型与实测压力拟合

总体模拟结果与实测结果拟合较好,说明本文建立的数学模型可以较好地反映该船闸分散式输水系统的出流水力特性。基于经验公式推算数学模型中阀门和支孔的阻力系数<sup>[13]</sup>,使分析计算值与实测值出现偏差,因此经验性建模方法固有的缺陷使得模型的预测结果与实际情况存在一定的差异。

### 3 支孔流量均匀性分析

在不同的实际工程中,分散式输水系统的前后支孔面积比均有差异,本文根据相关研究进展选取 9 个工况进行数值模拟计算,不同支孔面积比见表 2,将数学模型计算出的各支孔流量进行处理,得到流量过程曲线,对最大流量时刻的前、中、后段 3 个区域的流量计算求和,绘制流量对比见图 5,初步分析各段出流的均匀性,再通过不同的数值分析方法对各支孔流量进行均匀性评价。

表 2 不同支孔面积尺寸

工况	面积比	前段支孔 面积/m <sup>2</sup>	中段支孔 面积/m <sup>2</sup>	末段支孔 面积/m <sup>2</sup>
1	1.0	1.125	1.125	1.125
2	1.1	1.125	1.074	1.022
3	1.2	1.125	1.031	0.938
4	1.3	1.125	0.995	0.865
5	1.4	1.125	0.964	0.804
6	1.5	1.125	0.938	0.750
7	1.6	1.125	0.914	0.703
8	2.5	1.125	0.788	0.450
9	3.5	1.125	0.723	0.321

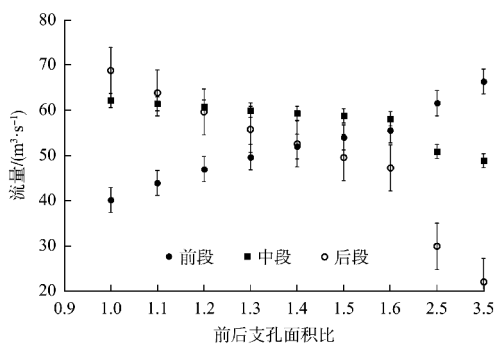


图 5 不同面积比下各段总流量

#### 3.1 支孔流量均匀度方差评价

提取出不同面积比下各支孔流量,利用方差

分析流量的离散程度:

$$\Delta Q = Q_{i,\max} - Q_{i,\min} \quad (10)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1} \quad (11)$$

式中:  $Q_{i,\max}$ 、 $Q_{i,\min}$  分别为某一面积比下各支孔峰值流量的最大值和最小值,  $\Delta Q$  为某一面积比下各支孔峰值流量最大值与最小值的差值,  $S^2$  为某一面积比下各支孔流量的方差,  $Q_i$  为某面积比下第  $i$  个支孔的峰值流量,  $\bar{Q}$  为某面积比下各支孔峰值流量的平均值。

该实际工程的输水时间为 12 min,选取原型总流量峰值时刻 347 s 及 2、4、6、8、10 min 这 5 个时刻对各支孔流量进行方差分析,见图 6,前后段支孔面积比为 1.5 时方差值较小。不同面积比下各支孔峰值流量差值见表 3。

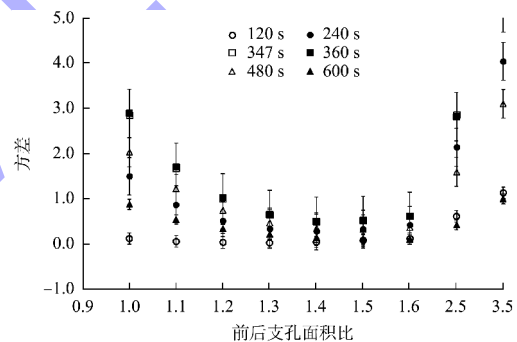


图 6 不同面积比下各支孔流量方差

表 3 不同面积比下各支孔峰值流量差值

工况	前后 段面 积比	孔峰值流 量最大值/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	孔峰值流 量最小值/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$\Delta Q_{ii}/$ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$S^2$
1	1.0	8.99	3.41	5.58	2.86
2	1.1	8.32	3.94	4.38	1.68
3	1.2	8.11	4.38	3.74	1.01
4	1.3	7.96	4.76	3.20	0.65
5	1.4	7.82	5.07	2.75	0.51
6	1.5	7.95	5.22	2.73	0.53
7	1.6	8.12	4.97	3.15	0.63
8	2.5	8.60	3.10	5.50	2.89
9	3.5	9.05	2.28	6.77	5.33

#### 3.2 支孔流量均匀度系数评价

提取不同面积比下各支孔同一时刻的流量,用均匀系数  $C_u$  描述该时刻支孔流量的离散程度,

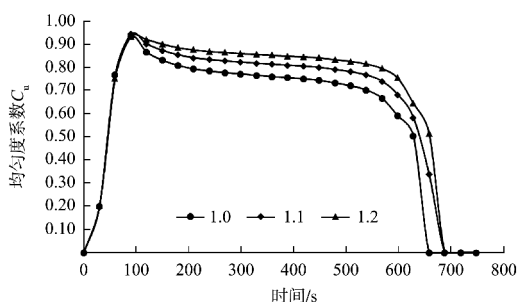


$C_u$  计算公式如下:

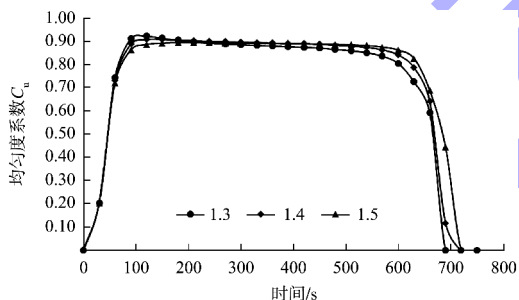
$$C_u = 1 - \frac{1}{\left| \frac{Q}{N} \right|} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \left| q_i \right| - \left| \frac{Q}{N} \right| \right)^2}{N}} \quad (12)$$

式中:  $q_i$  为第  $i$  个支孔流量;  $Q$  为总流量;  $N$  为支孔数量;  $C_u$  为均匀度系数,  $C_u = 1$  表示所有孔的流量等于平均值, 此时为最均匀状态, 反之  $C_u = 0$  表示完全不均匀。

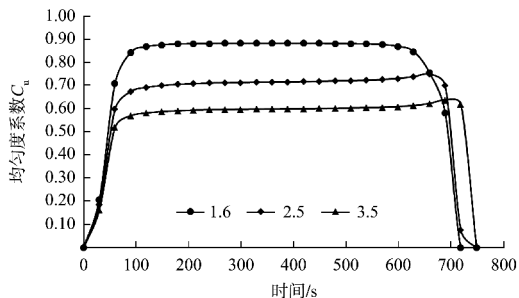
不同面积比下支孔流量均匀系数见图 7, 不同面积比下最大流量时刻各支孔均匀系数见表 4。



a) 工况1~3



b) 工况4~6



c) 工况7~9

图7 不同面积比下支孔流量均匀系数

表4 不同面积比下最大流量时刻各支孔均匀系数

工况	支孔面积比	闸室最大流量时刻 $C_u$ 值	剩余能量最大时刻 $C_u$ 值
1	1.0	0.76	0.78
2	1.1	0.82	0.83
3	1.2	0.86	0.87
4	1.3	0.87	0.88
5	1.4	0.89	0.89
6	1.5	0.90	0.91
7	1.6	0.88	0.88
8	2.5	0.71	0.72
9	3.5	0.59	0.60

#### 4 结论

1) 流量与前、中、后3测点的压力实测资料与计算模型拟合验证结果表明, 所建立的计算模型可较好地模拟船闸内流量和支孔压力的变化情况。

2) 分散式输水系统中, 支孔出流受到多个因素的影响, 包括作用水头、支孔间距以及支孔面积。前端支孔出流较早, 输水中期和后期的流量较小; 末端支孔出流较晚, 但由于管道末端的压力较大, 输水中期和后期的流量较大。

3) 船闸前后段支孔面积比对系统整体性能影响显著。在不同评价标准下, 过大或过小的前后段支孔面积比均导致前后段支孔的出流量差异增加。总体而言, 支孔出流均匀性随前后支孔面积比的增大呈现先提高后降低的趋势。对于本工程最佳前后段支孔面积比确定为 1.5。

#### 参考文献:

- [1] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 黎贤访, 李云, 王勇. 船闸闸墙廊道侧支孔射流研究[J]. 水利水运工程学报, 2011(1): 97-102.
- [3] 李中华, 宣国祥. 基于多因素的船闸输水系统选型方法[J]. 水运工程, 2020(10): 1-6.
- [4] 章海远, 须清华. 分散式船闸输水系统惯性超高的探讨[J]. 水运工程, 1994(1): 28-30, 23.

(下转第 199 页)