

· 航道及通航建筑物 ·



分散梯级船闸输水时的作用水头和 中间渠道断面形式对通航水流条件的影响 *

梅铃钦，安建峰，张首元，丁乐雨

(南京水利科学研究院，通航建筑物建设技术交通行业重点试验室，江苏南京 210029)

摘要：针对分散梯级船闸中间渠道的通航水流条件问题，研究了中间渠道断面形式对其影响。提出了矩形断面与梯形断面中间渠道的作用水头计算公式。采用数学数值模拟的方法研究两种断面形状对船闸通航水流条件的影响。结果表明：1) 中间渠道充泄水的船闸作用水头一致，其水位呈现周期性的变化。2) 改变中间渠道的断面形式对船闸输水时的流量变化趋势与输水时间影响较小。3) 相较于矩形断面，梯形断面的中间渠道可以有效地减小上游船闸泄水过程中的水位变幅、振荡波波高、最大水面坡降和最大纵向流速。研究为分散梯级船闸中间渠道的设计提供了理论支持。

关键词：中间渠道；作用水头；断面形式；通航水流条件

中图分类号：U65

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)04-0088-05

Influence of ross-section type and working head of intermediate channel on navigation flow conditions in decentralized cascade lock during water transfer

MEI Lingqin, AN Jianfeng, ZHANG Shouyuan, DING Leyu

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

Abstract: Regarding the problem of navigable water flow conditions within the intermediate channel of decentralized ladder locks, the present study delves into the impact of the intermediate channel section type on this aspect. A formulation for working head in the middle channel of rectangular section and trapezoidal section is proposed. Mathematical numerical simulation is used to study the influence of different section shapes on navigational flow conditions. The results show that: 1) The working head of the intermediate channel filling and emptying water is consistent, and its water level shows periodic changes. 2) Variations in section type have less effect on the flow trend and the time of water transfer at locks. 3) Compared with the rectangular section, the intermediate channel with trapezoidal section can effectively reduce the water level variation, oscillatory wave height, maximum water surface slope drop, and maximum longitudinal flow velocity during the upstream lock discharge. This study provides theoretical support for the design of intermediate channels in decentralized ladder locks.

Keywords: intermediate channel; working head; section type; navigation flow condition

船闸是通航建筑物的主要形式，按级数分为单级船闸和多级船闸，多级船闸按布置形式又可分为连续多级船闸和分散梯级船闸。分散梯级船

闸是一种通过中间渠道连接，并对复杂地形、地质条件具有良好适应性的高水头通航建筑物，具有调度灵活，可利用渠道的水域进行补水、溢水，

收稿日期：2023-07-25

*基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFC3206101）；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目（Y122010）

作者简介：梅铃钦（1998—），男，硕士研究生，从事通航水力学工作。

通讯作者：安建峰（1981—），男，博士，教授级高级工程师，从事通航水力学工作。E-mail：jfan@nhri.cn

发生故障率小, 通航保证率高^[1]等特点。分散梯级船闸的中间渠道作为一种典型的两端封闭限制性航道, 上游船闸泄水过程将在其内产生非恒定流, 引起水面波动、流速和流态的变化, 直接影响船舶通航的安全。

国内学者对中间渠道的水力特性进行了大量研究, 主要研究方法有数值模拟^[2]和物理模型^[3]试验。中间渠道的运行方式包括上下游船闸单独充泄水、同时充泄水以及错时充泄水3种方式。曹玉芬等^[4]采用物理模型试验的方法, 研究两端船闸运行方式对中间渠道的通航水流条件的影响, 结果表明上下游船闸同时充泄水时, 渠道内水流条件最差; 上下游船闸逐级充泄水时, 中间渠道产生水位涨落和波动。戈龙仔等^[5]依靠1:40船闸-中间渠道模型研究矩形断面中间渠道内非恒定长波运动的波动特性。试验结果表明: 上下游船闸运行时, 中间渠道最大水面比降与最大震荡波波高均取决于船闸最大输水流量。李广一等^[6]采用多相流模型和 RNG 模型, 研究船闸充泄水下渠道震荡波波高、水面比降以及流速等水力要素的变化情况。指出上下游船闸同时充泄水时流量成倍增长, 严重影响船舶航行与停泊安全, 不宜采用。祝龙等^[7]采用一维数学模型对中间渠道各参数与其水位波动的关系开展模拟研究, 表明中间渠道宽度、初始水深的增加能够较好地改善渠道内部水流波动特性。

中间渠道通常有矩形和梯形两种断面形式, 矩形断面布置形式较为简单, 上、下游两级船闸作用水头及渠道水位确定较为容易; 梯形断面时水域面积随水深线性变化, 影响船闸作用水头和中间渠道水位变动幅度的确定。目前, 国内外关于梯形断面形式下的中间渠道水级划分等问题研究极少, 中间渠道断面形式对其通航水流条件的影响规律尚未开展相关研究。

1 中间渠道水级划分

船闸作用水头是指船舶通过船闸时由于水体流动引起的水位变化所产生的压力差, 在船闸设

计中是一个极其重要的参数。船闸作用水头的大小直接关系船闸输水系统的选型以及阀门的运行方式, 是船闸设计的重要一环。

分散船闸运行时, 上游闸室向中间渠道泄水, 则中间渠道水位上升; 中间渠道向下游闸室泄水, 则渠道水位下降, 形成周期性涨落过程。由于中间渠道水域面积和闸室水域面积不等, 因此船闸最大工作水头并非总水头的一半, 而是在上游最高通航水位、下游最低通航水位组合下, 考虑中间渠道容纳水量及水位涨落而确定, 图1展示了中间渠道先充后泄的运行方式。对于相同的水深不同断面形式的中间渠道水域面积存在差异, 导致中间渠道总水量随水深变化关系呈非线性, 因此需要确定不同断面形式中间渠道的作用水头。

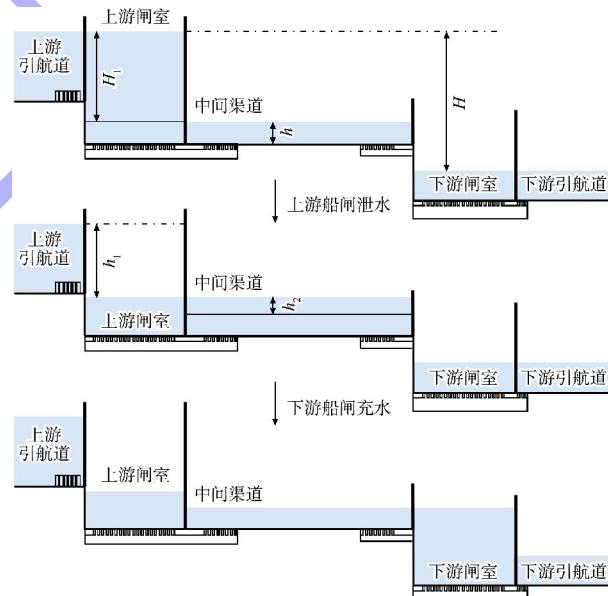


图1 中间渠道先充后泄

为保证分散梯级船闸连续运行稳定, 上游船闸单次泄水总量应与下游船闸单次输水总量相同, 即:

$$A_1 h_1 = kA_1 h_2 + 2mLhh_2 + mLh_2^2 = A_1 (H - h_1 - h_2) \quad (1)$$

式中: $A_1 h_1$ 为上游船闸泄水水量; $kA_1 h_2 + 2mLhh_2 + mLh_2^2$ 为中间渠道充水总量; $A_1 (H - h_1 - h_2)$ 为下游船闸充水总量; H 为分散梯级船闸总作用水头, m; h 为中间渠道充水前的水深, m; h_1 为上游船闸泄水时闸室水位变化值, m; h_2 为上游船闸泄水时渠

道水位变化值, m; A_1 为闸室水域面积, m^2 ; k 为中间渠道底面积与闸室面积的比值; m 为中间渠道边坡坡度; L 为中间渠道长度, m。

化简:

$$h_1 + h_2 = H - h_1 \quad (2)$$

式中: $h_1 + h_2$ 为上游船闸泄水时作用水头; $H - h_1$ 为下游船闸充水时作用水头, 若分散梯级船闸稳定运行且两端船闸闸室面积相同, 它的上游船闸泄水作用水头与下游船闸充水作用水头始终相同。

联立方程(1)、(2):

$$h_2 = \frac{A_1 H}{A_1 + 2kA_1 + 4mLh + 2mLh_2} \quad (3)$$

迭代方程(3), 即可获得 h_2 的数值解, 结合方程(2), 即可得到上游闸室水位变幅 h_1 与船闸作用水头 H_1 的数值解。分散梯级船闸稳定运行时, 中间渠道的水位呈现周期性变化, 相对于中间渠道底部, 最高水位为 $h+h_2$, 最低水位为 h 。

2 数学模型

2.1 一维数学模型

一维数学模型可以准确描述船闸充泄水时的非恒定流动。假设水不可压缩且均匀, 基于 Bernoulli 方程, 建立由能量方程与连续性方程组成的船闸充水控制方程^[8]。模拟分散梯级船闸中间渠道的充水过程。

非恒定流能量方程:

$$H = \xi_1 \frac{Q^2}{2gw^2} + \xi_2 \frac{Q^2}{2gw^2} + \frac{L_1 dQ}{gw dt} + \frac{L_2 dQ}{gw dt} \quad (4)$$

连续性方程:

$$Q = -\frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

式中: H 为闸室与中间渠道的水位差, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; ξ_1 为阀门前的阻力系数; Q 为输水流量, m^3/s ; w 为廊道面积, m^2 ; ξ_2 为阀门后阻力系数; L_1 为阀门前输水廊道惯性换算长度, m; L_2 为阀门后廊道惯性换算长度, m; A_1 为闸室水域面积, m^2 ; A_2 为中间渠道水域面积, m^2 ; t 为时间, s。

由于控制方程是一阶变系数非齐次非线性常

微分方程组, 采用有限差分法离散该微分方程, 求其数值解。

2.2 二维数学模型

二维模型可以描述船闸充泄水时, 中间渠道通航水流条件的变化情况。研究采用不可压缩的二维浅水方程, 对不同边界条件下的水位和流量变化进行模拟。

连续性方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial y}(hV) = 0 \quad (6)$$

动量方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

式中: x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; t 为时间坐标; h 为水深, m; z 为水位, m; U 、 V 分别为 x 、 y 方向上流速, m/s ; C 为谢才系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; u 、 v 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向的分量; v_t 为紊动黏性系数。

以一维数值模拟的结果作为二维数值模拟的流量边界条件, 所有流量均由流量边界流入。网格采用非结构三角网格, 见图 2。

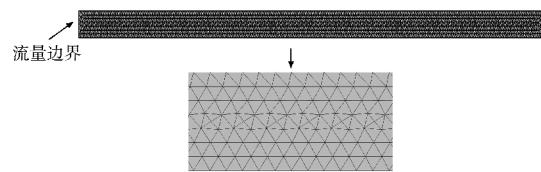


图 2 非结构网格

2.3 研究区域

梯形断面的中间渠道长 1 000 m、底宽 30 m, 两侧设置坡度为 2 的边坡, 矩形断面的中间渠道长 1 000 m、宽 30 m。分散梯级船闸总作用水头为 60.00 m, 中间渠道充水前水深为 4 m, 闸室面积为 5 000 m^2 。船闸输水阀门采用反弧形阀门, 阀门全开时间为 8 min。由公式得到矩形断面与梯级断面船闸作用水头分别为 32.31、31.38 m。本文

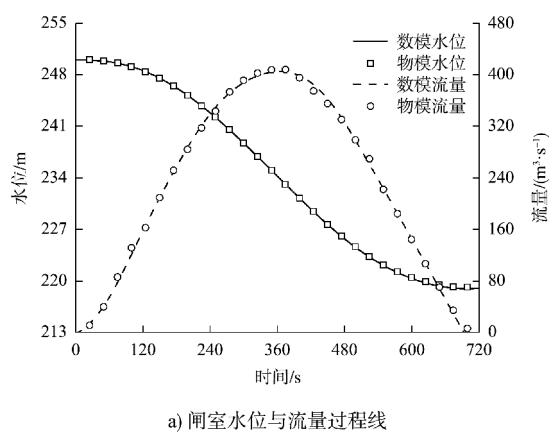
研究了中间渠道充水时的不同断面形式对通航水流条件的影响。

采取一维模型和二维数值模型相结合确定中间渠道通航水流条件。一维数值模拟结果提供二维数值模拟的流量边界, 由于中间渠道是两端封闭的限制性航道, 不需要提供下游水位边界。每隔 100 m 设置 1 个位于中间渠道中心线的观测点, 观测其最大纵向流速与最大水面坡降变化情况。

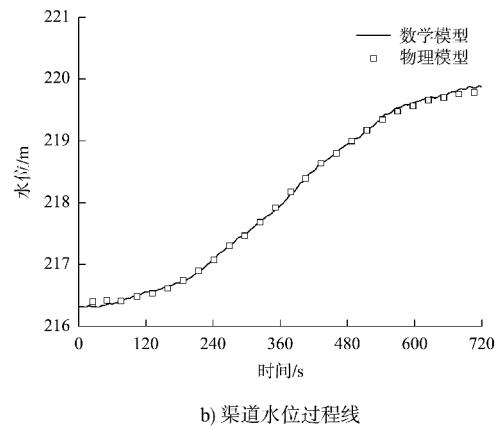
2.4 模型验证

针对国内某分散梯级船闸工程, 结合相应的物理模型试验成果, 对数学模型离散方法和求解方式进行验证。某工程采用 1:30 的整体物理模型, 上游水位 250.00 m, 下游水位 186.00 m, 总水头 64.00 m。中间渠道总长约 930 m, 中间渠道初始水位 216.27 m, 渠道两侧分别有 1:1.20 的边坡和 1:1.25 的边坡, 长度分别为 757、379 m, 阀室面积 5 312 m², 中间渠道底面积 42 230 m²。

将一维数学模型的模拟结果与物理模型试验的闸室水位、输水流量进行比较与验证, 见图 3a)。结果显示: 一维模型模拟的分散梯级船闸上游船闸泄水过程中闸室水位、输水流量均与物理模型试验数据总体趋势吻合较好, 可以准确地模拟分散梯级船闸的上游船闸泄水过程中输水流量的变化规律。将二维数学模型的模拟结果与物理模型试验的中间渠道水位变幅进行比较, 见图 3b)。结果显示: 物理模型试验的观测数据与二维数值模拟结果吻合较好, 可以准确地反映上游船闸泄水时中间渠道水位变幅情况。



a) 阀室水位与流量过程线



b) 渠道水位过程线

图 3 上游船闸泄水过程

3 结果分析

3.1 中间渠道的流量与输水时间

由一维数学模型得到不同坡度下上游船闸泄水时的实时输水流量以及对应的输水时间。中间渠道充水时, 在输水流量达到峰值前, 中间渠道的断面形式基本不影响输水流量的变化趋势与最大流量。输水流量达到峰值前, 梯形断面的中间渠道流量略大于矩形断面的中间渠道。矩形断面、梯形断面的中间渠道充水时间分别为 571、588 s。相较于矩形断面的中间渠道, 梯形断面的输水时间增大了 2.98%, 无显著差距, 其流量过程线见图 4。由此可见, 上游船闸向中间渠道泄水过程中, 改变中间渠道的断面形式对流量变化趋势与输水时间影响较小。

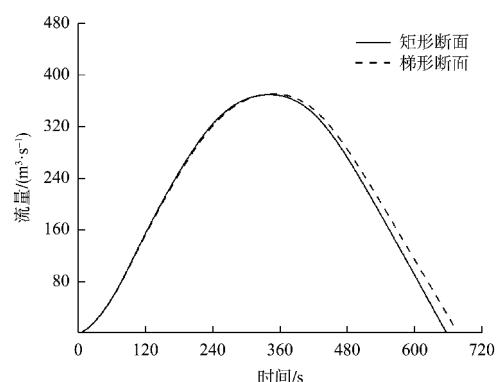
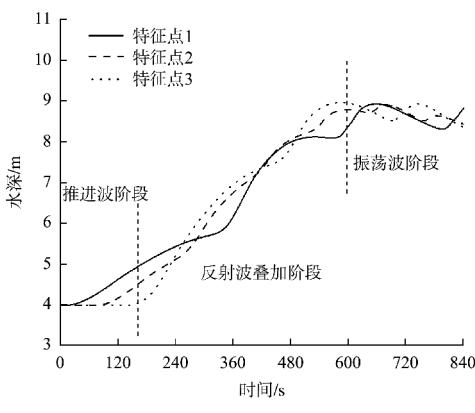


图 4 不同坡度的中间渠道充水时流量过程

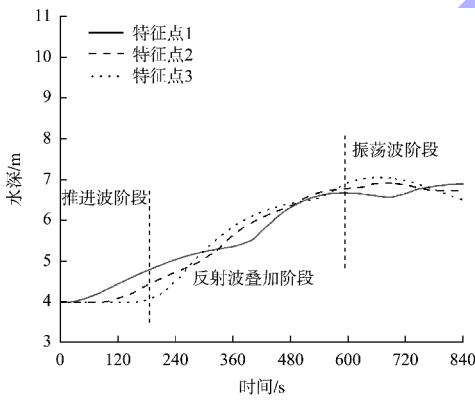
3.2 中间渠道波动形态

中间渠道的波动形态见图 5, 特征点 1、2、3 分别位于中间渠道上游段、中间段、下游段, 推进波阶段从输水开始至特征点 3 水深发生改变,

此阶段各特征点水深变幅主要由泄水流量曲线决定。反射波叠加阶段，推进波到达中间渠道下游边界开始反射、叠加。在输水结束后，进入振荡波阶段，各个特征点水位波动稳定，随着时间的变化，最终各特征点水深变幅持续衰减至 0。由图可知，矩形断面的中间渠道充水期间，水深变幅更大，反射波叠加阶段水位变幅更加剧烈，振荡波波高更大。



a) 矩形断面



b) 梯形断面

图 5 上游船闸泄水各特征点水深变化

3.3 水面坡降

中间渠道不同断面形式对其不同时刻最大水面坡降的影响见图 6。矩形断面的中间渠道最大水面坡降为 2.08‰出现在 360 s 时，受到波叠加的影响，矩形断面的中间渠道水面坡降从 480 s 急剧增加，在 570 s 时再次达到峰值，最大水面坡降为 2.05‰。梯形断面的中间渠道最大水面坡降为 1.24‰出现在 390 s，之后持续下降，480 s 后稳定在 0.40‰附近。总体而言，梯形断面的中间

渠道可以有效减小由两端船闸充泄水引起的水面坡降。

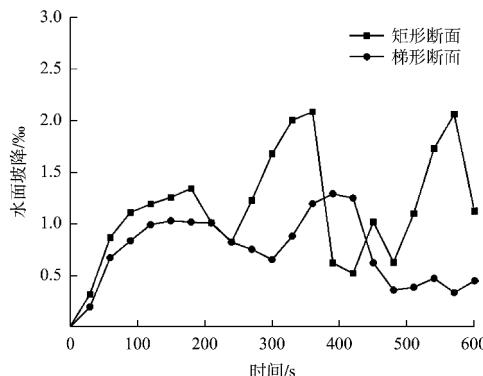


图 6 不同断面形式的中间渠道不同时刻最大水面坡降

3.4 中间渠道的纵向流速

中间渠道不同断面形式对其不同时刻纵向流速的影响见图 7。受到阀门充水的影响，中间渠道的纵向流速与流量的大小直接相关，随着流量的增大而增大。矩形断面的最大纵向流速为 2.05 m/s 出现在 300 s 时；梯形断面最大纵向流速为 1.87 m/s 出现在 330 s 时。矩形断面与梯形断面最大纵向流速变化趋势相同，均为先上升、后下降。相较于矩形断面，梯形断面可以减小渠道流速的主要原因是其中间渠道拥有更大的断面面积。

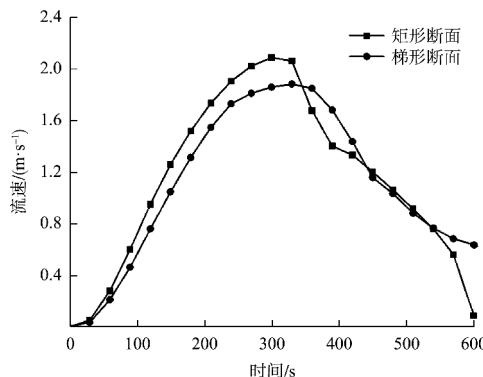


图 7 不同断面形式的中间渠道不同时刻纵向流速

4 结论

- 分散梯级船闸稳定运行下上游船闸向中间渠道泄水的作用水头与中间渠道向下游船闸充水的作用水头一致，中间渠道水位呈现周期性的变化。相较于矩形断面，梯形断面的中间渠道船闸作用水头更小。

(下转第 106 页)