

梯形闸门出流流动特性研究

孟万尚^{1,2}, 李琳^{1,2}, 赵帅杰^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了解梯形闸门这种新型平板闸门的出流流动特性, 采用模型试验和量纲分析的方法, 对梯形闸门淹没出流时的流动特性进行了试验研究和理论分析。试验结果表明: 梯形闸门下游发生淹没出流时, 淹没程度越大, 收缩断面距离闸门越近, 收缩断面横向水面差越小, 闸后急变流过渡至渐变流所需要的距离越短。基于流态分析, 结合量纲分析和数值拟合得到了梯形闸门流态判别条件, 并推导了淹没出流流量计算公式, 对该公式的评价和检验结果表明, 平均相对误差在5%以内, 计算精度较高。

关键词: 梯形闸门; 梯形渠道; 淹没出流; 流态判别; 流量

中图分类号: TV131; TV663⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2025)01-0032-07

Research on flow characteristics of trapezoidal sluice gate discharge // MENG Wanshang^{1,2}, LI Lin^{1,2}, ZHAO Shuaijie^{1,2} (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: To investigate the outflow characteristics of the trapezoidal sluice gate, a novel type of flat gate, model experiments and dimensional analysis were used to conduct experimental studies and theoretical analyses on the flow characteristics of submerged flow through the trapezoidal sluice gate. The experimental results indicate that when the submerged outflow occurs downstream of the trapezoidal sluice gate, the greater the degree of submergence is, the closer the contracted section is to the gate, the smaller the transverse water surface difference at the contracted section is, and the shorter the distance required for the transition from rapidly varied flow to gradually varied flow downstream of the gate is. Based on flow pattern analysis, combined with dimensional analysis and numerical fitting, the flow pattern discrimination criteria for the trapezoidal sluice gate were obtained, and an equation for calculating the submerged discharge was derived. The evaluation and verification of this equation show that the average relative error is within 5%, indicating a high level of calculation accuracy.

Key words: trapezoidal sluice gate; trapezoidal channel; submerged flow; flow pattern discrimination; discharge

灌区渠道分为干渠、支渠、斗渠、农渠和毛渠等渠系类型, 为了实现渠道的分水和控制过流, 渠道上常需要设置节制闸和分水闸^[1]。平板闸门具有结构简单、安装方便、运行安全以及成本低廉等优点, 是渠道首选的闸门类型^[2]。研究人员对平板闸门进行了大量相关研究工作。例如: 赵文谦^[3]结合理论分析和试验研究, 绘制了水力自动翻板闸门的流量系数变化图, 推导出流量系数计算公式; 傅宗甫等^[4,5]基于水工模型试验对浮体平板闸门沉浮过程的水力特性进行了分析, 得到了撞击力与过闸流量的关系; Albertson

等^[6]研究了平板闸门的出流特性, 提出了自由出流和淹没出流条件下的流量系数方程, 并采用曲线的形式表达流量系数的变化。Rajaratnam等^[7]证实了Albertson等^[6]的研究, 并提出了新的流量系数公式; Swamee^[8]基于大量试验数据, 使用图解法求解了自由出流和淹没出流的流量系数公式, 并给出了流态判断依据, 而Kubrak等^[9]修正了其淹没出流公式。随着人工智能技术的发展, 国内外涌现出多种流量计算模型^[10-11]。例如: 管光华等^[12]提出了一种基于实测数据率定的适用于多种流态的流量计算模型; Rady

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A182); 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室2023年研究项目(ZDSYS-YJS-2023-08)

作者简介: 孟万尚(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工水力学研究。E-mail: mengws0209@163.com

通信作者: 李琳(1979—), 女, 教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: lilin_xjau@163.com

等^[13]利用反向传播神经网络计算模型对平板闸门在自由和淹没状态下的水力特性进行了深入研究,并得到了预测流量系数的两个广义方程。

除了广泛应用的平板闸门外,弧形闸门和异形闸门也作为水流调控设施应用于灌区中^[14-16]。国内外学者采用不同方法推导了弧形、圆形、半圆形和椭圆形闸门流量计算公式。例如:郭永鑫等^[17-18]对弧形闸门的流态辨识方法进行了重新定义,并给出了流量计算公式;Marashi等^[19]对半圆形渠道上的旋转闸门采用叠加原理、量纲分析、流量系数法3种方法推导了淹没出流流量计算公式;Pilbala等^[20]基于大量试验数据推导了淹没出流条件下椭圆形闸门的流量系数计算公式。

梯形闸门是一种新型平板闸门^[21],主要由门叶系统、门架系统、渠道预埋件系统、启闭系统4部分组成(图1)。梯形渠道上设置梯形闸门进行分水和水流调控时不需要修建闸室和闸室相连的扭面等附属建筑物,可降低混凝土用量、施工难度和工程投资。同时,梯形闸门沿垂直方向启闭时底边与侧边的止水均相当于底止水,止水效果好且磨损小。李琳等^[22]基于试验研究对梯形闸门自由出流的流态特性进行了分析,并采用多元回归分析方法推导了梯形闸门自由出流的流量系数计算公式,但对闸后淹没出流时的流态特性、流态判别方法及流量计算公式尚未有相关研究。实际工程中灌区各级渠道受地形条件限制以及不同级渠道糙率不同和下游渠道闸门运行工况的影响,闸后会出现淹没出流工况,针对闸后淹没出流

流态特性和流量计算方法进行研究,对于梯形闸门在工程实践中的应用尤为重要。本文借鉴前人对各类型闸门水力特性的相关研究方法,通过试验研究和理论分析对梯形闸门淹没出流的流态特性、流态判别方法及流量计算方法开展研究。

1 试验方法

1.1 试验装置

物理模型试验在新疆农业大学水利与土木工程学院水力学及水工实验室进行。试验装置(图2(a))的制作和安装均严格按照设计图纸进行,模型尺寸的误差控制在 $\pm 0.1\text{ mm}$,而模型安装的误差控制在 $\pm 0.3\text{ mm}$ 以内。在试验过程中,水泵将地下水库的水抽到高位水池中,并保持高位水池水位不变,然后通过供水管道连接到长3 m的稳水箱,稳水箱之后是一段长度为6 m的梯形渠道,其渠道底宽 $b = 0.15\text{ m}$,底坡 $i = 1/1000$ 。为了方便观察梯形闸门在不同试验条件下的流态特性,在梯形闸门上游1 m和下游2 m的渠段采用亚克力板制作,而渠段的其他部分则采用了PVC板。另外,在梯形渠道的末端设置了一个翻板闸门,在淹没出流试验中,通过调节翻板闸门的开度来控制下游渠道水深。经过翻板闸门后的水流进入三角形量水堰,最后通过回水渠返回地下水库,实现试验系统的循环(图2(a))。

试验中梯形闸门是通过高精度雕刻机切割8 mm厚的透明亚克力板制成的,梯形闸门采用两侧的螺杆进行启闭操作,使用0.02 m的方形钢通过螺栓将门架系统和支撑臂进行拼接,闸门的底部边缘和止水装置与原型闸门一样。闸门开度 e 为梯形闸门底边与渠道底板之间的垂直距离,试验中通过亚克力方块来控制。图2(b)为模型试验中梯形闸门闸前总水头测量示意图。不同于水力学中平板闸门闸前总水头的测量方法(即在渠道上游一定长度设置一个测量断面来测量闸前总水头),试验中闸前总水头 H_0 采用的测量方法为:在距离闸门底边8 mm的地方等距60 mm设置了3个直径为2 mm的测压孔,测压管一端连接在这些孔上,另一端与直径

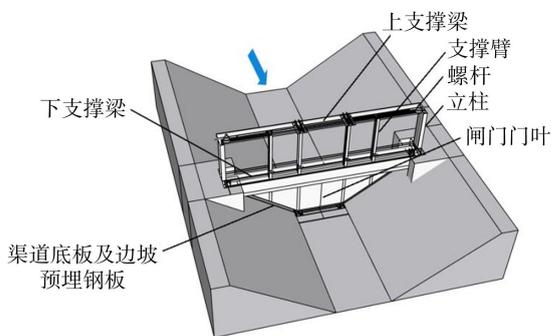


图1 梯形闸门示意图

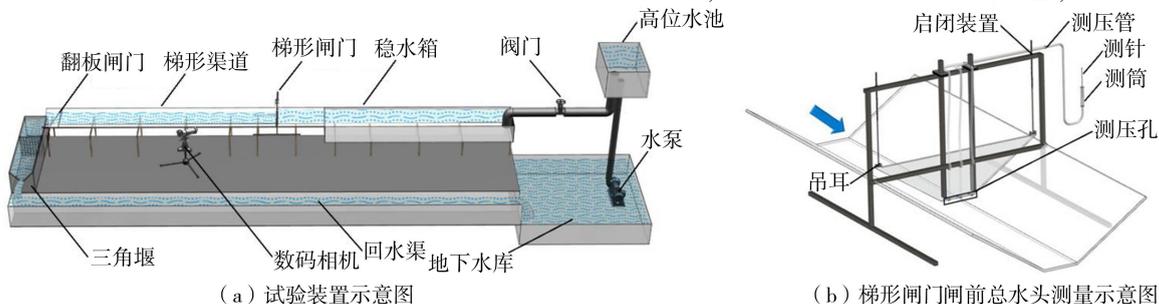


图2 模型试验示意图

为 40mm 的测筒连接。使用精度为 ± 0.1 mm 的测针测量筒内水面的高程,水面高程与闸门所在断面渠底高程差值定义为闸前总水头,由于水流受到闸门的阻挡,该断面处水平流速为 0,垂向流速较小,忽略不计。本文采用闸前总水头 H_0 与过闸流量 Q 建立梯形闸门的水位流量关系,主要基于两个原因,一是新疆南疆河流普遍含沙量高,灌水期进入灌区各级引水渠道的水流含沙量高,节制闸局部开启时闸前壅水,降低了闸前流速,由此造成泥沙在闸前和上游渠道大量淤积,致使按照传统方法在闸前渠道测量断面上测量的闸前水深、闸前流速因受泥沙淤积的影响而失真,而采用本文方法时梯形闸门底边与渠道底板之间的流速大于上游渠道断面流速,即在闸门处渠道底板上无泥沙淤积,在该断面测量的总水头可代表闸门处的实际水头;二是未来应用于实际工程时采用本文方法更便于实现流量的自动化计量,可以在闸门面板上设置多组自动压力传感器,通过读取准确的闸前总水头,实现闸门开度的自动调整。

1.2 试验方案

由于梯形闸门形状与渠道形状相同,当渠道边坡系数不同时梯形闸门形状也不同。因此,试验前调查了新疆大型灌区梯形渠道的边坡系数 m ,主要为 1.5、1.75 和 2 这 3 种。因此,本文在这 3 种渠道边坡系数的梯形渠道上设置梯形闸门开展了系列试验,共计 317 组,试验工况见表 1。为明晰梯形闸门

的流态判断依据,建立淹没出流的流量计算公式,分别设置了自由出流试验 84 组,淹没出流试验 233 组。

为了观察梯形闸门淹没出流流态及水面线变化规律,沿渠道中轴线及其两侧共布置 5 条测线用于测量闸前、闸后水面线沿程变化规律,分别命名为 C 、 L_1 、 L_2 、 R_1 、 R_2 ,垂直于测线布置测量断面,如图 3(a)所示,设任一测量断面距离闸门的距离为 x ,用渠道顶宽 B 对 x 无量纲化处理,即 $X=x/B$; Y 为测点距中轴线距离与渠道 1/2 顶宽之比,即 $Y=2y/B$;图 3(b)为测量断面的横截面示意图,其中渠道水深为 h ,采用闸前总水头 H_0 对其进行无量纲化处理,即 $Z=h/H_0$,采用精度为 ± 0.1 mm 的测针进行水深测量。

2 闸后流态与水面线

按表 1 工况开展试验,结果表明,在渠道边坡系数为 1.5、1.75 和 2 的梯形渠道上设置梯形闸门时闸后流态基本一致,因此下文以渠道边坡系数 $m=1.5$ 、过闸流量 $Q=10$ L/s、闸门开度 $e=4$ cm 为例对梯形闸门的闸后流态进行分析。如图 4 所示(图中 h_1 为下游渠道水深),梯形闸门的出流可以分为 3 个部分:左孔出流、底孔出流和右孔出流。从图 4(a)可以看出,自由出流时,闸后水流呈现收缩-扩散-收缩的急变流,远离闸门后逐渐趋近于渐

表 1 试验工况

渠道边坡系数	闸门开度/m	闸前总水头/m	下游渠道水深/m	过闸流量/(L/s)	试验组数	流态
1.5	0.03	0.0375~0.1400	0.045~0.080	3.8~10.5	7	自由出流
	0.04	0.0500~0.1400	0.050~0.100	4.7~13.8	7	自由出流
	0.05	0.0625~0.1400	0.060~0.110	7.4~17.2	7	自由出流
	0.07	0.0875~0.1400	0.085~0.130	12.4~23.0	7	自由出流
1.75	0.02	0.0250~0.1400	0.030~0.080	2.6~9.9	7	自由出流
	0.04	0.0500~0.1400	0.050~0.100	4.8~15.2	7	自由出流
	0.05	0.0625~0.1400	0.060~0.110	6.8~17.7	7	自由出流
	0.07	0.0875~0.1400	0.080~0.120	12.7~25.0	7	自由出流
2	0.02	0.0250~0.1300	0.030~0.065	2.6~7.9	7	自由出流
	0.04	0.0500~0.1300	0.055~0.090	6.2~15.1	7	自由出流
	0.05	0.0625~0.1300	0.070~0.110	9.9~18.4	7	自由出流
	0.06	0.0750~0.1300	0.075~0.110	10.8~21.3	7	自由出流
1.5	0.03	0.0700~0.1500	0.060~0.130	5.0~10.5	23	淹没出流
	0.04	0.0800~0.1500	0.070~0.130	7.0~13.0	18	淹没出流
	0.05	0.0900~0.1500	0.080~0.130	9.0~14.0	18	淹没出流
	0.07	0.1100~0.1600	0.090~0.130	16.0~18.0	12	淹没出流
1.75	0.02	0.0750~0.1450	0.055~0.110	4.0~7.0	18	淹没出流
	0.04	0.0800~0.1450	0.070~0.120	7.6~11.2	24	淹没出流
	0.05	0.0850~0.1450	0.080~0.120	9.4~14.5	23	淹没出流
	0.07	0.1000~0.1500	0.090~0.120	13.2~18.3	18	淹没出流
2	0.02	0.0600~0.1350	0.050~0.110	3.3~6.4	24	淹没出流
	0.04	0.0750~0.1350	0.070~0.120	7.1~12.1	23	淹没出流
	0.05	0.0850~0.1350	0.080~0.120	10.0~14.3	24	淹没出流
	0.06	0.1000~0.1400	0.090~0.120	13.4~16.2	18	淹没出流

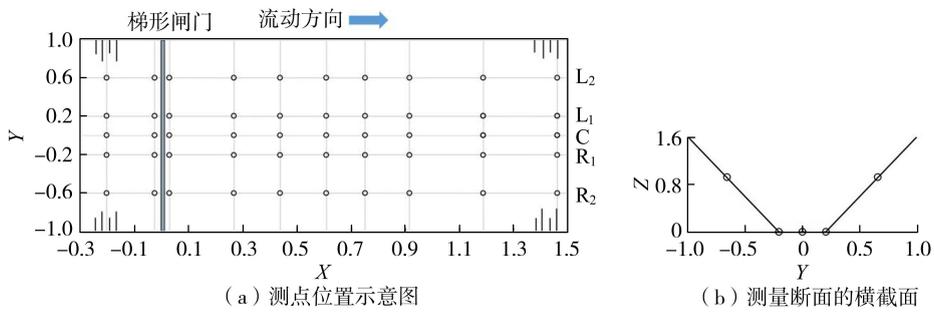


图3 测量断面

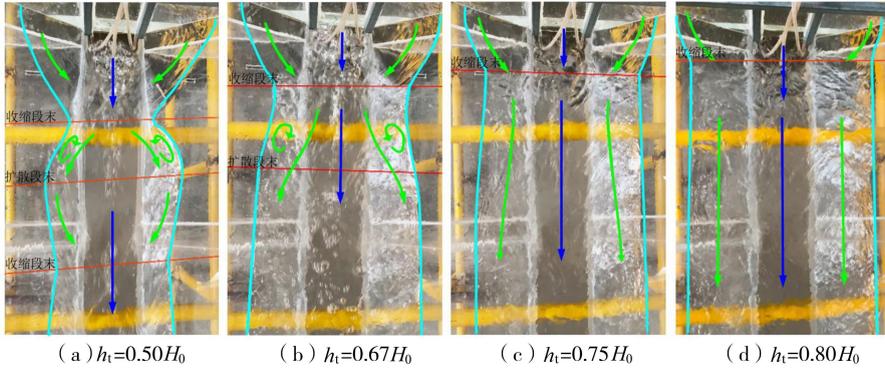


图4 梯形闸门闸后流态变化

变流。李琳等^[22]对梯形闸门自由出流时的流态特性进行了详细分析,本文重点分析淹没出流时的流态特性。逐渐关闭翻板闸门,翻板闸门前形成壅水,渠道水深增加,收缩断面向闸门移动(图4(b)~(d)),收缩断面横向水面差减小,扩散段处回流区减小,收缩段与扩散段从后向前依次被淹没,当壅水影响至第一个扩散段末后下游水流趋于稳定,如图4(b)所示。继续关闭翻板闸门,过闸水流所受阻力随下游水深的增大而增大,因此,收缩断面位置不断向闸门靠近,横向水面差继续减小,扩散段两侧回流逐渐消失,如图4(c)所示。再进一步关闭翻板闸门,收缩断面继续上移,经过距离很短的急变流区就

与渠道中的渐变流衔接,如图4(d)所示。

由于下游水深不同时,不同淹没程度下收缩段末、扩散段末、平稳段始出现的位置不同,图5为闸后典型断面横向水面线分布。在 $X=0.027$ 时(图5(a)),自由出流和不同淹没程度的淹没出流具有形状相同的横向水面线分布,边墙处水面高于中轴线处水面,这是因为水流通过闸门后刚开始收缩,3股水流还未发生碰撞,两侧水深明显大于中轴线处水深。图5(b)为收缩断面水面横向分布情况,横向水面在 $h_t=0.50H_0$ 时呈“凸”形,形似“驼峰”,即边墙处水面位于中轴线处水面之下。随着下游水深增大,“驼峰”峰值逐渐减小,边墙处水面逐渐趋

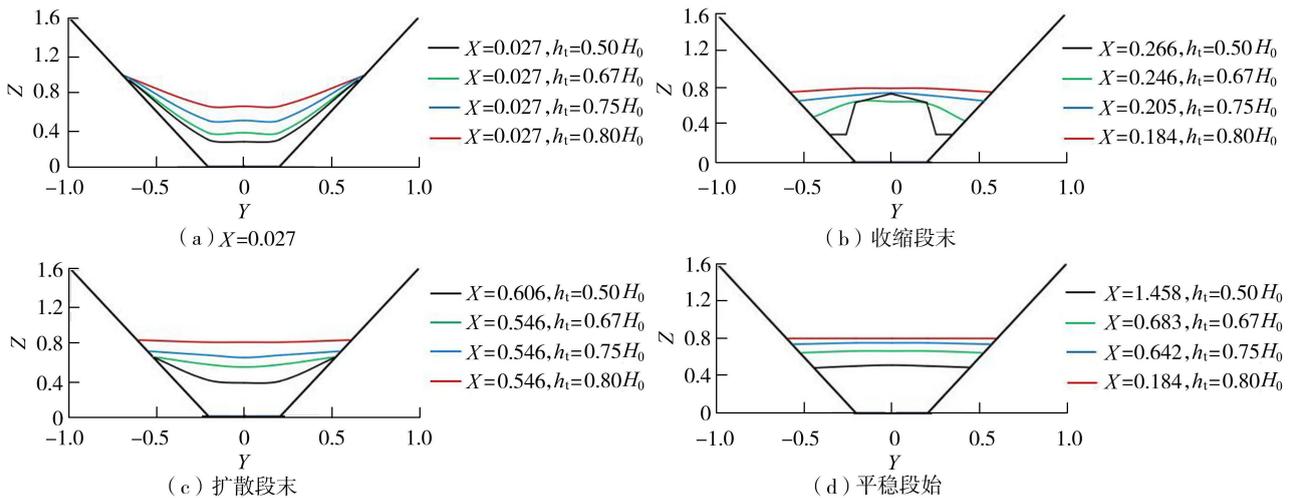


图5 典型断面横向水面线分布

近于中轴线处水面,而在 $h_1 = 0.80H_0$ 时收缩断面的横向水面线几乎水平,水深增大,流速减小,动能减小,3股水流交汇碰撞后势能减小,中轴线处水深减小,横向水面差减小。如在下游渠道水深 h_1 从 $0.50H_0$ 增大至 $0.80H_0$ 的过程中,横向水面差 ΔZ 由 0.44 减小至 0.06 。从图 5(c) 可以看出, $h_1 = 0.50H_0, 0.67H_0, 0.70H_0$ 时的中轴线处水面低于边墙处水面,而 $h_1 = 0.80H_0$ 时横向水面线几乎水平。这是因为水历经碰撞后向边墙处扩散导致边墙处水深增加,随着淹没程度的增大,碰撞效应减弱,水流扩散受阻,横断面的水面高差变小,水流趋于均匀分布所需要的距离变短。

梯形闸门闸后下游水面以中轴线为对称轴对称分布,因此纵向水面线仅对测线 C、 L_1 、 L_2 进行分析,如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着下游渠道水深的增加,淹没程度越来越大,梯形闸门下游水流达到渐变流所需要的距离越来越短。图 6 中数据点标注了闸后收缩段末出现的位置,随着下游渠道水深从 $0.50H_0$ 增大至 $0.80H_0$,收缩段末出现的位置从 $X = 0.266$ 变化至 $X = 0.184$,即下游水深增加 92.86% ,收缩断面位置前移了近 50% ,收缩断面距离闸门越来越近。对比分析水深方向的变化,可以发现从 C 测线(中轴线)至 L_2 测线(左边墙),相同淹没程度下,无量纲渠道水深 Z 逐渐减小,但在 $h_1 = 0.80H_0$ 时 Z 未发生变化,渠道中间和边墙处水深相等,即水流到达稳定状态,进一步表明在高淹没程度下过闸水流经过短距离的收缩段后直接与渐变流衔接。

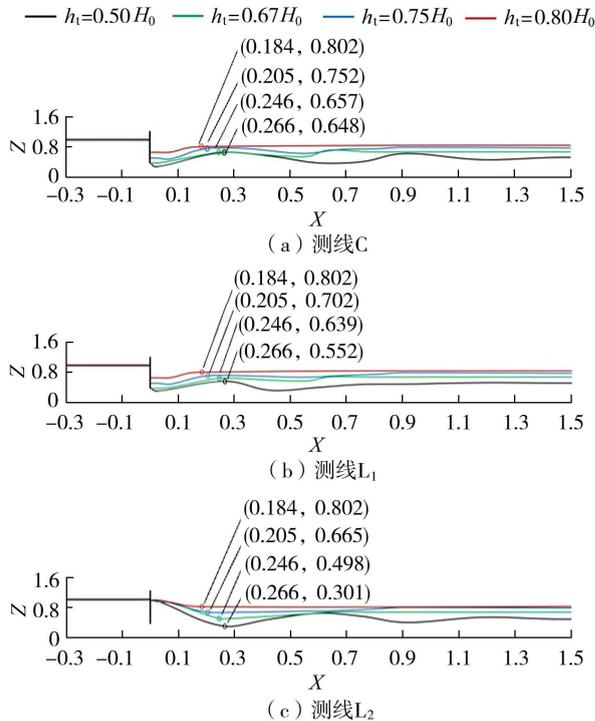


图 6 典型断面纵向水面线分布

3 梯形闸门流量系数的确定

3.1 流态判别

基于梯形闸门闸后流态分析,经过试验数据验证后发现流量 Q 正比于闸前总水头 $\sqrt{H_0}$ ^[23]。因此,可以通过式(1)来计算梯形闸门的流量。

$$Q = C_d v A = C_d A \sqrt{2gH_0} \quad (1)$$

其中 $A = be + 2[em(H_0 - e) + 0.5e^2m]$

式中: C_d 为流量系数; v 为平均流速; A 为梯形闸门口出流的过水断面面积。

闸孔自由出流条件下影响流量系数 C_d 的物理参数为闸门开度 e 、闸前总水头 H_0 、水的密度 ρ 、重力加速度 g 、动力黏滞系数 ν ,淹没出流时在自由出流基础上还应考虑下游渠道水深 h_1 的影响,流量系数 C_d 及各影响因素之间的关系表示为

$$f(C_d, e, H_0, \rho, g, \nu, h_1) = 0 \quad (2)$$

以 e, ρ, g 为基本物理量,选用长度、质量和时间的量纲 L, M, T 为基本量纲,根据 π 定理和量纲和谐原理可得:

$$f(C_d, H_0/e, \nu/\rho\sqrt{ge^3}, h_1/e) = 0 \quad (3)$$

式中 $\nu/\rho\sqrt{ge^3}$ 与 $1/Re$ (Re 为雷诺数) 量纲相同,在具有自由表面的流动中可以忽略。式(3)可以转化为

$$C_d = f'(H_0/e, h_1/e) \quad (4)$$

将渠道边坡系数 $m = 1.5, 1.75, 2$ 各工况下流量系数 C_d 随 H_0/e 和 h_1/e 的变化绘制于图 7 中,可以看出,当 H_0/e 一定时,随着 h_1/e 的增大,流量系数减小,这是由于随着 h_1/e 的增大,淹没程度增大导致闸孔出流的阻力增大,减少了上、下游之间的水头差,造成流速减小、动能减小、势能减小,使得流量系数减小。此外,当 h_1/e 接近 H_0/e 时,过流量几乎为 0,因此,流量系数趋向于 0,这与实际闸门出流情况是相符合的。当 H_0/e 大于 h_1/e 时,水头增大,过流量增大,流量系数增大,当 H_0/e 达到最大值 H_{0max}/e 时(为自由出流),流量系数为最大值,因此, $h_1/e < H_0/e < H_{0max}/e$ 时闸孔过流即为淹没出流。从图 7 可以得到不同 h_1/e 值对应的 H_{0max}/e ,将这些值点绘在图 8 中,并通过数值拟合得到:

$$H_{0max}/e = A(h_1/e)^B \quad (5)$$

式中 A, B 为常数。因此,梯形闸门淹没出流和自由出流发生的条件分别为

$$h_1 < H_0 < Ah_1(h_1/e)^{B-1} \quad (6)$$

$$H_0 \geq Ah_1(h_1/e)^{B-1} \quad (7)$$

本文试验条件下,可拟合出 $A = 1.46, B = 1.06$ 。应用于实际工程时除考虑梯形渠道边坡系数的影响

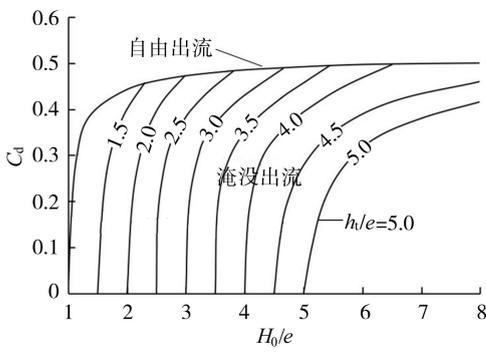


图7 流量系数变化

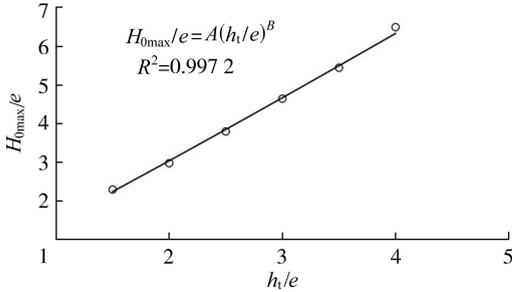


图8 H_{0max}/e 与 h_1/e 的关系

外,还可能要考虑底坡、糙率、宽深比等因素的影响,可通过原型或模型试验对 A 、 B 值进行率定。

3.2 淹没出流流量计算

为了给出梯形闸门淹没出流条件下流量系数的精确方程,给工程设计和实际应用提供准确的淹没出流流量计算依据,本文推导出梯形闸门淹没出流时的过闸流量 Q_s 计算公式。由式(1)有:

$$Q_s = C_d A \sqrt{2gH_0} \quad (8)$$

梯形闸门3孔过流时会相互影响,因此在淹没出流条件下考虑流动边界对过流量的影响,将其综合到流量系数 C_d 中。结合试验现象和理论分析可知, C_d 主要与闸门开度 e 、闸前总水头 H_0 、下游渠道水深 h_1 、渠道底宽 b 、渠道边坡系数 m 有关,可表示为

$$C_d = f(e/H_0, h_1/H_0, \eta) \quad (9)$$

其中 $\eta = be/2 [em(H_0 - e) + 0.5e^2m]$

式中 η 为底孔出流面积与两侧出流面积之比。

针对不同渠道边坡系数的梯形闸门流量系数 C_d ,从表1工况试验结果中随机选取了135组数据对式(9)进行非线性多项式拟合。在使用不同的拟合方法时,流量系数的方程会产生差异。为了得到更加准确和简明的结果,通过比较不同拟合方法的拟合度选用了模型拟合精度更高、形式更简单的方程式,即:

$$C_d = 0.268 + \frac{e}{H_0} \left(4.014 \frac{h_1}{H_0} + 0.471\eta - 3.690 \right) - \frac{h_1}{H_0} (3.651\eta - 0.041) + 3.236\eta \quad (R^2 = 0.76) \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)即得到梯形闸门淹没出流时的过闸流量计算公式:

$$Q_s = \left[0.268 + \frac{e}{H_0} \left(4.014 \frac{h_1}{H_0} + 0.471\eta - 3.690 \right) - \frac{h_1}{H_0} (3.651\eta - 0.041) + 3.236\eta \right] A \sqrt{2gH_0} \quad (11)$$

以平均相对误差、均方根误差、标准误差和标准化均方根误差作为评价式(11)计算精度的评价指标,计算得到4个评价指标值分别为5.20%、0.0007 m³/s、6.75%和4.83%,可见式(11)的计算精度较高。

为了验证式(11)的有效性,选取表1工况试验结果中未参与公式推导的45组试验数,计算得到平均相对误差为4.79%、均方根误差为0.0006 m³/s、标准误差为6.26%、标准化均方根误差为4.30%,这表明式(11)的计算精度较高。图9给出了式(11)的相对误差绝对值 $|\delta|$ 与 h_1/H_0 的关系,通过观察数据点误差可以发现,误差小于5%的数据占比为68%,表明式(11)的精度较好。

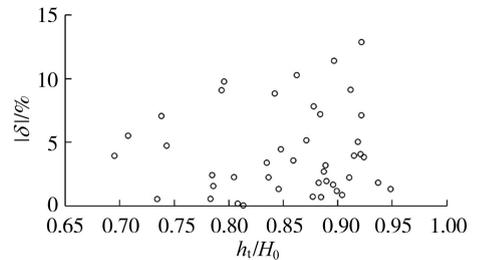


图9 相对误差绝对值与 h_1/H_0 的关系

由于式(11)是建立在矩形闸门流量公式基础上的,主要考虑闸门出流为急变流,局部水头损失对其出流影响较大,因而通过流量系数法得到的式(11)忽略了渠道底坡和糙率对流量的影响。因此需要进一步的研究来探讨渠道衬砌材料不同时粗糙度对流量计算公式的影响,并对其进行修正以提高其计算精度和在实际工程中的应用范围。

4 结论

a. 在淹没出流情况下,闸后仅存在一个收缩断面,随着淹没程度增大,收缩段末出现的位置离闸门变近,由于下游渠道水深的增加导致闸孔出流的阻碍力增大,出流速度减小,侧孔和底孔出流的碰撞减弱,收缩段末的水面凸起现象不明显,水流趋于均匀分布所需要的距离缩短。

b. 基于试验数据提出了梯形闸门流态的判别条件,当 $h_1 < H_0 < Ah_1(h_1/e)^{B-1}$ 时为淹没出流,当 $H_0 \geq Ah_1(h_1/e)^{B-1}$ 时为自由出流。实际应用时还应考虑底坡、糙率、宽深比等因素的影响,需要通过试验

率定。

c. 推导出梯形闸门淹没出流的流量计算公式,公式的平均相对误差为 4.79%、均方根误差为 $0.0006\text{ m}^3/\text{s}$ 、标准误差为 6.26%、标准化均方根误差为 4.30%,表明流量计算公式精度较好,可为梯形闸门实际应用中测量梯形渠道流量提供依据。

参考文献:

- [1] 孙振江,王怀福,王玉顺. 闸孔出流流量推算方法研究[J]. 山东水利,2008(6):8-12. (SUN Zhenjiang, WANG Huaifu, WANG Yushun. Study on the projection method of outflow flow rate from gate holes[J]. Shandong Water Resources,2008(6):8-12. (in Chinese))
- [2] 秦晨光. 平板节制闸自由出流计算方法研究:以槐店闸为例[D]. 郑州:郑州大学,2020.
- [3] 赵文谦. 翻板闸门的水力特性[J]. 成都科技大学学报,1982(1):51-62. (ZHAO Wenqian. Hydraulic properties of turnover gate[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology,1982(1):51-62. (in Chinese))
- [4] 傅宗甫,严忠,吕家才,大型浮体闸水工模型试验方法[J]. 水利水电科技进展,2007,27(5):6-9. (FU Zongfu, YAN Zhong, LYU Jiakai. Method for hydraulic model test of large-scale floating sluice[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(5):6-9. (in Chinese))
- [5] 傅宗甫,殷晓锦,顾晓峰. 浮体闸动水沉浮过程水力特性[J]. 水利水电科技进展,2014,34(5):24-27. (FU Zongfu, YIN Xiaojin, GU Xiaofeng. Hydraulic characteristics of floating sluices subsiding and buoying in flowing water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(5):24-27. (in Chinese))
- [6] ALBERTSON M L, DAI Y B, JENSEN R A, et al. Discussion:diffusion of submerged jet[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers,1950,115:687-97.
- [7] RAJARATNAM N, SUBRAMANYA K. Flow equation for the sluice gate[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division,1967,93(3):167-186.
- [8] SWAMEE P K. Sluice-gate discharge equations [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,1992,118(1):56-60.
- [9] KUBRAK E, KUBRAK J, KICZKO A, et al. Flow measurements using a sluice gate;analysis of applicability [J]. Water,2020,12(3):819.
- [10] DOU Ming, QIN Chenguang, LI Guiqiu, et al. Research on calculation method of free flow discharge based on artificial neural network and regression analysis[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2020,72:101707.
- [11] SALEHI S, AZIMI A H. Discharge characteristics of weir-orifice and weir-gate structures[J]. Journal of Irrigation

- and Drainage Engineering,2019,145(11):04019025.
- [12] 管光华,黄一飞,熊骥,等. 平板闸门自由-淹没孔流统一流量率定模型[J]. 农业工程学报,2020,36(22):197-204. (GUAN Guanghua, HUANG Yifei, XIONG Ji, et al. Uniform flow rate calibration model for flat gate under free-submerged orifice flow[J]. Transactions of the Chinese society of Agricultural Engineering,2020,36(22):197-204. (in Chinese))
- [13] RADY, EL-HADY R A. Modeling of flow characteristics beneath vertical and inclined sluice gates using artificial neural networks [J]. Ain Shams Engineering Journal,2016,7(2):917-924.
- [14] HAGER W H. Circular gates in circular and U-shaped channels [J]. Journal of irrigation and drainage engineering,1987,113(3):413-419.
- [15] MARASHI A, KOUCHAKZADEH S, YONESI H A, et al. Hydraulics of rotary gate: novel structure for semicircular canals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2021,147(4):04021003.
- [16] BIJANKHAN M, KOUCHAKZADEH S, BAYAT E. Distinguishing condition curve for radial gates [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2011,22(6):500-506.
- [17] 郭永鑫,汪易森,郭新蕾,等. 基于流态辨识的弧形闸门过流计算[J]. 水利学报,2018,49(8):907-916. (GUO Yongxin, WANG Yisen, GUO Xinlei, et al. New discharge algorithms of radial gates based on the flow regime identification [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(8):907-916. (in Chinese))
- [18] GUO Yongxin, GUO Xinlei, WANG Yisen, et al. Flow condition identification and discharge calibration for submerged radial gates [J]. Journal of Hydraulic Research,2021,59(4):683-690.
- [19] MARASHI A, KOUCHAKZADEH S, RASHIDI N, et al. Rotary gate: submerged flow condition [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2021,81:102035.
- [20] PILBALA A, SAJJADI S M, BEJESTAN M S. Hydraulic performance of elliptical-LOPAC gate under submerged flow conditions[J]. Ain Shams Engineering Journal,2021,12(1):317-326.
- [21] 张鲁国,李琳. 一种梯形闸门:CN202020053138.9[P]. 2020-09-25.
- [22] 李琳,赵帅杰. 垂直梯形闸门自由出流水力特性试验研究[J]. 水利学报,2023,54(6):677-685. (LI Lin, ZHAO Shuaijie. Study on the hydraulics of vertical trapezoidal sluice gate under free flow conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(6):677-685. (in Chinese))
- [23] HENDERSON F M. Open channel flow[M]. New York: The Macmillan Company,1966.

(收稿日期:2024-01-04 编辑:熊水斌)