

U形渠道平板闸门过流能力试验研究

胡明宇, 王文娥*, 胡笑涛, 王世隆, 樊凯, 刘渡坤

(西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 【目的】实现U形渠道闸门测流, 设计U形渠道平板闸门并进行试验研究, 分析其水力性能, 建立流量公式。【方法】流量范围10~50 L/s内, 控制闸门开度 e , 进行U形渠道平板闸门过流能力试验, 根据沿程水深、佛汝德数 Fr 、水头损失等水力参数分析了U形平板闸门孔流与堰流分界点的判定依据及过流能力, 建立了不同流态的闸孔出流公式。【结果】U形平板闸门孔堰流判定依据相对开度 e/H (H 为闸前稳定水头)接近1, Fr 沿程分布规律较统一, 平均相对水头损失达7%, 流量公式误差小于3.5%, 不易出现自由出流。【结论】U形平板闸门水头损失较小, 水力性能较优, 流量公式的测流精度较高, 可为灌区U形渠道流量测量提供依据。

关键词: U形渠道; 闸门; 水力性能; 闸孔出流; 量水

中图分类号: TV135.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022326

OSID:



胡明宇, 王文娥, 胡笑涛, 等. U形渠道平板闸门过流能力试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 116-122.

HU Mingyu, WANG Wen'e, HU Xiaotao, et al. Experimental Study of Flow Characteristics Through Sluice Gates in U-Shaped Channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 116-122.

0 引言

【研究意义】灌区量水是灌溉用水合理配置、按方计收水费制度实施和灌区现代化管理的重要保障, 也是实现农业节水灌溉的重要手段^[1]。随着U形渠道在灌区小型渠道中的广泛应用, 研究人员设计研发了适用于U形渠道的抛物线形量水槽^[2]、圆柱体量水槽^[3-4]、机翼形量水槽^[5]、量水平板^[6]等量水设施。在各种量水设施中, 闸门是利用已有水工建筑物测流的设施, 可以避免修建特设量水设施引起的二次水头损失, 具有操作简单、投资低等优点^[7-9], 也可实现测控一体化, 在小型渠道中有广泛的应用前景。【研究进展】工程应用中主要有平板闸门、弧形闸门和人字闸门3种闸门形式, 平板闸门结构简单、施工方便、经济实用、结实耐用^[10-12], 在灌区较为常见。目前在平板闸门水力计算方面已进行大量研究, 并建立了流量基本公式^[13]。管光华等^[14]针对平板闸门的率定问题, 提出一种形式简单、精度较高的率定模型, 可对自由出流、淹没出流和堰流3种流态进行统一率定。Kubrak等^[15]验证了淹没出流条件下闸门测流的可行性, 其流量公式经过修正后测流精度较高。叶云涛等^[16]针对宽顶堰平板闸门, 基于经验公式回归分析得出了闸孔出流的流量公式。

Silva等^[17]运用多种平板闸门流量公式, 对比评价了不同方法对闸孔出流不同流态的计算效果, 认为基于能量和动量方程的方法更优。Ferro^[18]建立了从宽顶闸门顶部和底部同时泄流的水位流量关系, Vaheddoost等^[19]通过隐式方程推导出收缩系数和能量损失系数, 提高了淹没出流下的闸门测流精度。【切入点】这些研究主要针对矩形渠道矩形闸门建立流量公式, 由于U形渠道底部有圆弧段, 与矩形渠道水力特性差异较大, 目前对于灌区U形渠道U形平板闸门过流能力还缺少深入系统的研究及适用的流量公式。

【拟解决的关键问题】本研究从北方灌区末级渠道输配水的实际情况出发, 根据U形渠道结构和尺寸, 设计了一种U形平板闸门, 通过闸孔出流水力性能试验, 分析不同流态下的沿程水面线、佛汝德数的变化规律及孔流与堰流分界点的判定依据。在闸孔出流基本公式^[20]的基础上, 建立U形平板闸门自由出流和淹没出流的流量公式, 为灌区末级渠道量水设备的选择提供理论参考。

1 材料与方法

试验在西北农林科技大学北校区水工厅进行, 试验布置见图1(a)。试验系统由泵房、调节阀门、稳水池、尾门、有机玻璃U形渠道、U形平板闸门、薄壁三角堰、回水渠道等组成。U形渠道体形参数见图1(a), 长1 200 cm, 渠顶宽53 cm, 深45 cm, 底弧直径40 cm, 中心角152°; 外倾角14°; 渠道底坡1/1 000,

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 陕西省水利科技计划资助项目(2021slkj-8); 西北农林科技大学大学生创新训练计划国家级项目(202110712116)

作者简介: 胡明宇(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事水力学与水工建筑物研究。E-mail: 915323507@qq.com

通信作者: 王文娥(1975-), 女, 教授, 博士, 主要从事流体机械与流体动力学、节水灌溉理论与技术研究。E-mail: wangwene@nwsuaf.edu.cn

综合糙率0.011。

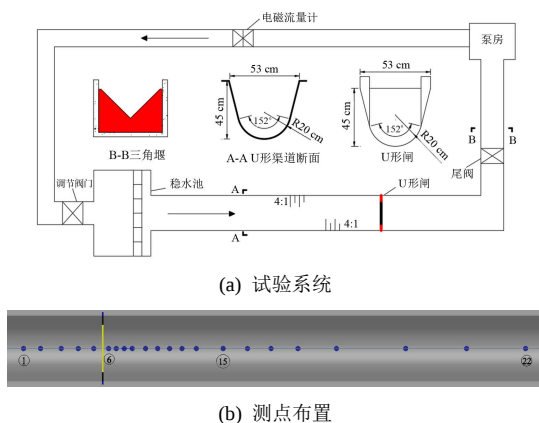


图1 试验系统及测点布置

Fig.1 Experimental system and layout of measuring points

U形平板闸门分为闸板和两侧挡水板, 闸板底部

设计为弓形, 与渠底弧形段形状相同。闸板长39 cm, 高45 cm, U形平板闸门总长53 cm。两侧挡水板与渠边固定, 使水流只能从闸板底部过流, 过流断面接近弓形。

U形平板闸门设在距进水口700 cm处, 闸门前后共布置22个测点, 如图1(b)和表1所示。水位采用SCM60型水位测针测量, 精度为0.1 mm。流量范围10~50 L/s, 每隔5 L/s左右1个工况, 如表2。实际流量采用回水渠段的薄壁三角堰测量, 计算式为:

$$Q=1.41H^{2.5} \quad 0.021 \text{ m} \leq H < 0.200 \text{ m}, \quad (1)$$

$$Q=1.343H^{2.47} \quad 0.200 \text{ m} \leq H < 0.300 \text{ m}, \quad (2)$$

式中: Q 为流量(m^3/s); H 为堰上水头或闸前水位(m)。

表1 渠内测点位置

Table 1 Layout of measuring points in the channel

测点序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
距闸门的距离/cm	-70	-55	-40	-25	-10	5	10	15	20	30	40
测点序号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
距闸门的距离/cm	50	60	70	90	110	130	150	180	230	280	330

表2 试验工况

Table 2 Experimental conditions

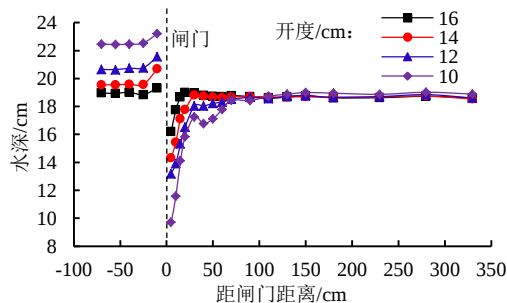
试验流量/(L s^{-1})	10	16	22	27	32	36	40	45	50
开度/cm	5~8	5~10	5~12	6~14	6~16	8~16	8~18	8~18	8~18

2 结果与分析

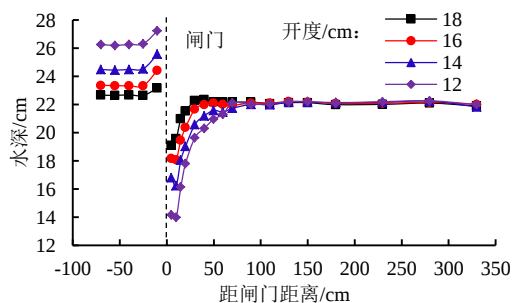
2.1 水面线

水面线的变化可以直观地反映出渠道内的流态变化过程。图2和图3分别给出了不同开度和不同流量情况下淹没出流水面线分布, 对比分析发现: 闸门上游水流较为平稳, 水位变化不大, 靠近闸门处水位因闸门阻水水深增加(水位壅高), 该水深与上游稳定水位处的水深增加的水深称为相对壅高, 随着来流量

的增大和开度的降低, 闸门阻水作用越明显, 闸前的水位壅高幅度随之变大。水流过闸时, 靠近边壁处水流绕闸门两侧喷射而出, 与闸底流出的水流汇合于闸后中心区域, 形成2处旋涡扰动表层水流, 波及下游两侧, 形成2块回流区域, 使得收缩断面附近水流紊动剧烈, 水位最低。远离回流区后水位迅速升高, 水流逐渐平缓, 同一流量时开度减小, 下游水位涨幅极小, 开度不变时上下游水位受流量影响较大。



(a) $Q=36 \text{ L/s}$



(b) $Q=45 \text{ L/s}$

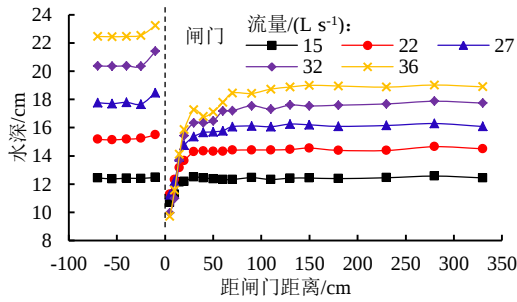
图2 淹没出流不同开度水面线

Fig.2 Water surface line under different gate openings for submerged flow

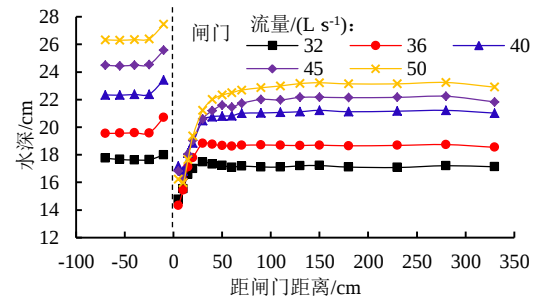
试验中发现大流量、小开度时会出现自由出流(图4、图5), 由图4、图5可知, 自由出流时, 随着流量的增大和闸门开度的降低, 紧贴闸门处上游水位的壅高逐渐消退。这是因为闸前水位的壅高影响范围

逐渐向上游蔓延, 使得上游水位的整体涨幅偏大。闸后水流经过收缩断面后起伏不定, 在下游逐渐平缓, 若不控制下游水位, 闸后会形成明显的水翅现象, 即水流冲击两侧边壁后产生的折冲水流, 汇聚于渠道中

心出现水流的明显壅起, 交叉水流两侧出现回流区, 这种现象甚至一直延续到渠尾。



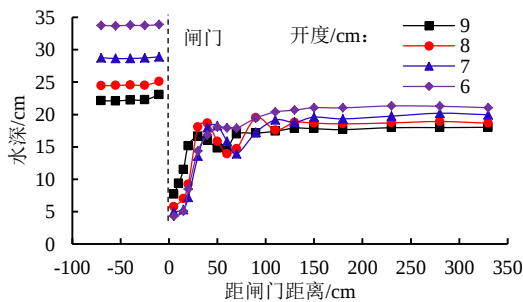
(a) $e=10$ cm



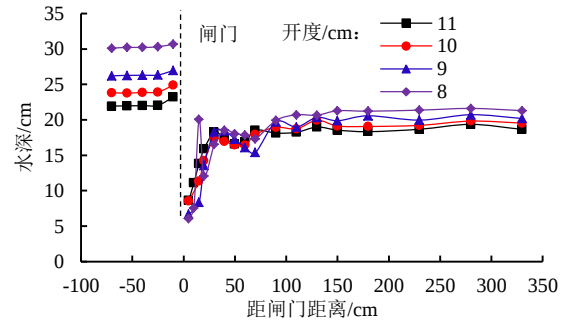
(b) $e=14$ cm

图3 淹没出流不同流量水面线

Fig.3 Water surface line under different flow rates for submerged flow



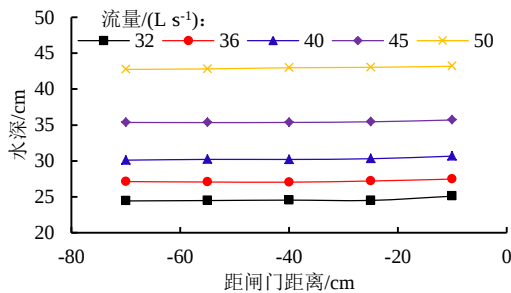
(a) $Q=32$ L/s



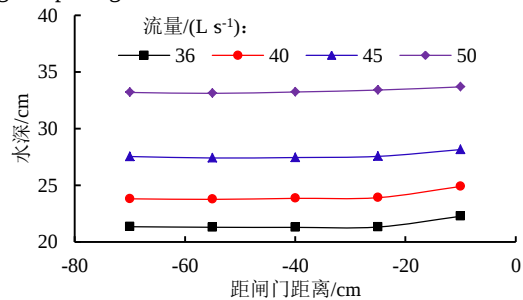
(b) $Q=40$ L/s

图4 自由出流不同开度水面线

Fig.4 Water surface line under different gate openings for free flow



(a) $e=8$ cm



(b) $e=10$ cm

图5 自由出流不同流量闸前水面线

Fig.5 Water surface line in front of the gate under different flow rates for free flow

2.2 佛汝德数

佛汝德数 (Fr) 是判别明渠流态的重要参数, 可根据佛汝德数沿程分布了解U形渠道闸孔出流的流场变化。采用式 (3) 计算佛汝德数, 计算式为:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

式中: v 为断面平均流速 (m/s); g 为重力加速度, 取 $9.81 m/s^2$; h 为断面平均水深 (m)。

流量为 $32 L/s$ 和 $40 L/s$ 时淹没出流的佛汝德数沿程分布, 如图6所示, 淹没出流时, 同一流量下上游水流的 Fr 基本不变, 临近闸前 Fr 降低, 下降幅度随开度减小而增大, 上游水流都是缓流, 随着流量的增大 (图7), 上游水流变得平缓, Fr 呈减小的趋势。流量不变时, 上游水流的 Fr 随开度的减小而减小, 且降幅也在增大; 开度不变时, Fr 随流量的增大逐渐减小, 变幅在减小。水流过闸后, 收缩断面附近出现 Fr_{max} ,

多为缓流, 最大不超过2, 闸后 $50 cm$ 以内的 Fr 有随流量的增大和开度的减小逐渐变大的趋势。随后 Fr 急剧减小, 跌落到0.5左右, 远离旋涡后水流逐渐平缓, Fr 缓缓降低然后基本保持不变。同一流量时随开度变化, 下游的 Fr 变幅极小, 同一开度下, 不同流量的下游 Fr 变化稍大一些, 整体来看, 流量越大, 开度越小, 下游的 Fr 越小。

图8反映了流量 $32 L/s$ 和 $40 L/s$ 时自由出流下不同开度的佛汝德数沿程分布情况。由图8可知, 自由出流的 Fr 沿程分布规律较统一, 闸前 Fr 分布情况与淹没出流时相似, 紧贴闸门处 Fr 降低, 开度越小, 闸前的相对壅高越不明显, Fr 下降幅度越小, 相比淹没出流, 自由出流的闸前水流更平顺, Fr 略小。水流流出闸底后, Fr 在收缩断面有最大值, Fr_{max} 随流量的增大和开度的降低而增大, 峰值可达到6, 远高于淹没出流的

Fr_{max} 。闸后少有临界式水跃,远驱式水跃更常见,发生临界式水跃时,收缩断面后的水流波动不大, Fr 略有起伏,而后水流迅速恢复平顺, Fr 基本保持不变,

如图8所示。发生远驱式水跃时,水跃前出现明显的水翅现象,同一断面内的水深分布极不均匀, Fr 难以测定。

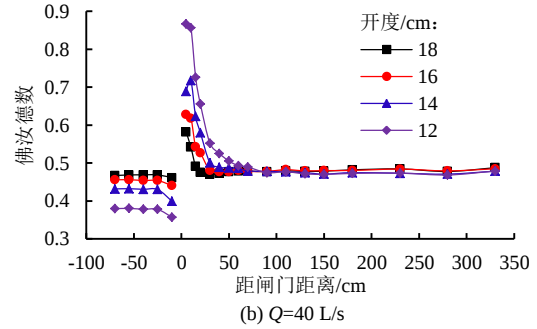
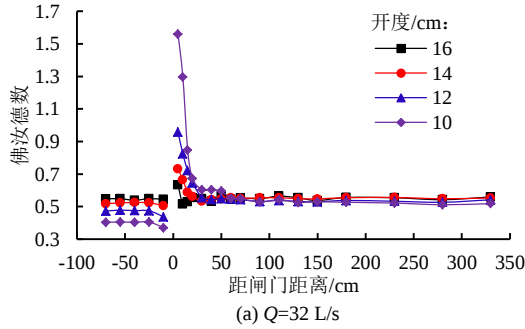


图6 淹没出流不同开度下佛汝德数沿程分布

Fig.6 Froude number along the way under different gate openings for submerged flow

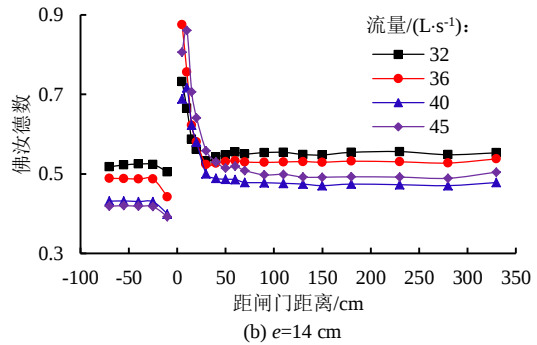
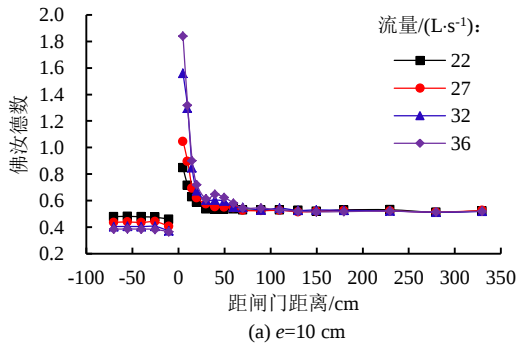


图7 淹没出流不同流量佛汝德数沿程分布

Fig.7 Froude number along the way under different flow rates for submerged flow

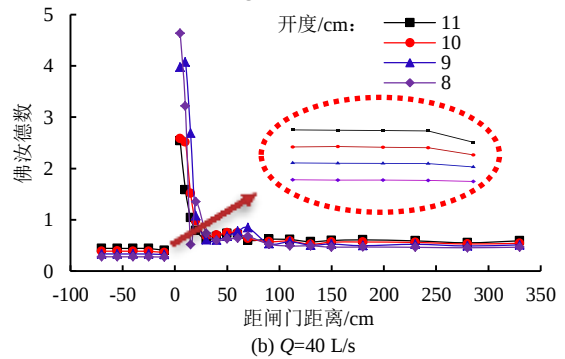
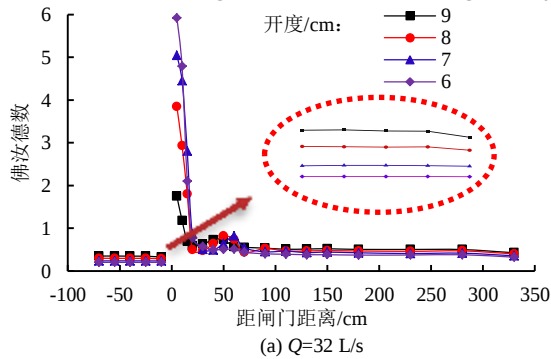


图8 自由出流不同开度下佛汝德数沿程分布

Fig.8 Froude number along the way under different gate openings for free flow

2.3 堰流与孔流判别阈值

孔堰流分界点流态如图9所示,水面刚接触到闸门弧底,闸门尚未起到挡水作用。自分界点缓缓减小闸门开度,因闸门底部为弓形,此时开度较大,仅闸门弧底挡水,闸门两侧为堰流,渠道出现孔堰流并存的状态。当闸门弧形段完全浸入水面时,堰流消失,此时流态为闸孔出流(图10)。本试验的临界相对开度 e/H 随流量的变化如图11所示,图11中 e/H 随流量的增大变化极小,可认为等于1,这是因为试验平板闸门下部为弓形,水流刚好脱离闸门下缘时为点接触(平板闸门弓矢),横断面的水面接近水平,基本没有侧收缩影响,闸前水位与闸后水位基本相等。



图9 孔堰流分界点流态

Fig.9 Flow regime of critical ratio for orifice flow and weir flow

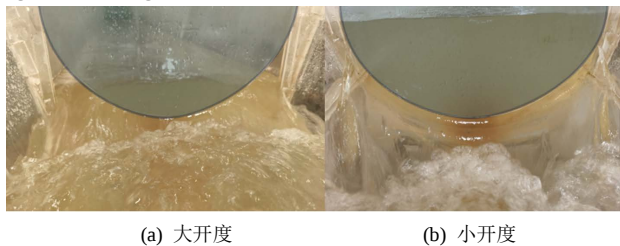


图10 闸孔出流流态

Fig.10 Flow regime of orifice flow

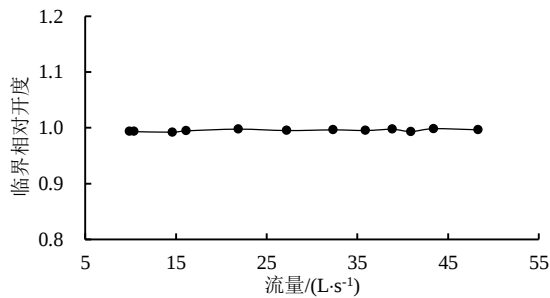


图 11 临界相对开度随流量变化

Fig.11 Changes of critical relative gate openings

2.4 水头损失

选取水流平稳的上游断面1和下游断面2, 分别是图1(b)中测点4和测点22所在断面, 以下游出水口渠底水平面为基准面, 列出能量方程, 得出水头损失占上游总水头的百分比。

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{f1-2}, \quad (4)$$

式中: h_1 和 h_2 分别为断面1和断面2单位质量水体的压能(m); v_1 和 v_2 分别为断面1和断面2的平均流速(m/s); z_1 和 z_2 分别为断面1和断面2单位质量水体的位能(m); h_{f1-2} 为断面1和断面2之间的水头损失。

图12反映了8种流量下淹没出流的水头损失情况, 可以看出, 同一开度下相对水头损失随流量的增大而增大, 同一流量下开度越小水流紊动越剧烈, 相对水头损失越大。8种流量下淹没出流的相对水头损失比在2%~16%以内, 最小为2.35%, 平均相对水头损失为6.89%。

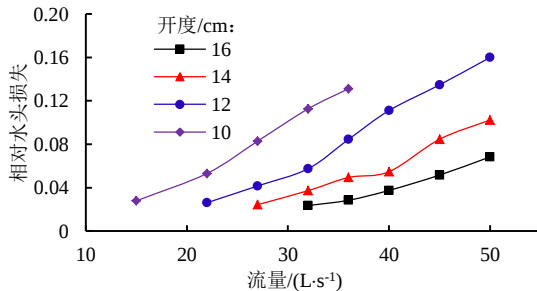


图 12 淹没出流不同开度下相对水头损失比较

Fig.12 Relative head loss under different gate openings for submerged flow

2.5 流量公式与测流精度

2.5.1 自由出流

通过分析闸孔出流的水力现象, 确定影响U形平

表 3 不同试验流量下不同开度渠道的临界淹没度

Table 3 Critical submerged criterion of different gate openings under different flow rates

指标	22 L/s		32 L/s				40 L/s			
	6 cm	5 cm	9 cm	8 cm	7 cm	6 cm	11 cm	10 cm	9 cm	8 cm
临界淹没度	0.76	0.70	0.81	0.77	0.70	0.63	0.86	0.82	0.77	0.71

由试验数据得U形渠道U形平板闸门的临界淹没度在0.63~0.86之间, 平均值为0.75。试验中小流量下不易出现自由出流, 只有流量较大时将闸门调至小开

板闸门自由出流过流条件的物理参数为闸门开度、上游水深、过闸水面宽度和重力加速度, 根据经验公式回归分析得到流量公式:

$$Q = 0.3977 \left(\frac{e}{H} \right)^{0.17} b e \sqrt{2gH}, \quad (5)$$

式中: b 为过流宽度(m); e 为闸门开度(m)。

图13为计算流量值与实测值对比。研究发现, 计算值与实测值的最大相对误差为6.27%, 最小相对误差为0.30%, 平均相对误差为3.37%。结果表明, 自由出流状态的流量公式基本满足小型渠道的测流精度要求。

2.5.2 淹没出流

相比自由出流过流条件, 淹没出流状态下增加一个物理参数: 下游水深, 回归分析得到淹没出流条件下流量公式:

$$Q = 1.7073 \left(\frac{e}{H} \right)^{0.6264} b e \sqrt{2g\Delta H}, \quad (6)$$

式中: ΔH 为上下游水深差(m)。

式(6)的流量系数包含了淹没出流中淹没度的影响, 代入得到淹没出流下计算值, 流量实测值与计算值对比后(图13), 可得最小相对误差为0.13%, 平均相对误差为3.27%, 测流精度满足灌区量水设施要求。

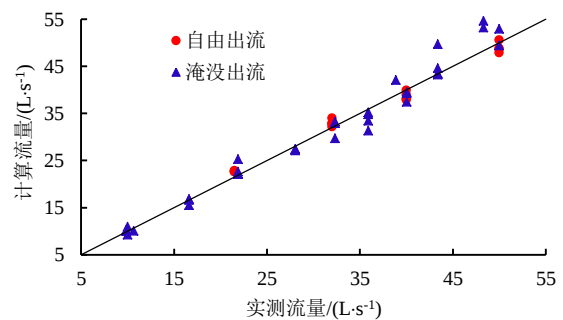


图 13 计算流量与实测流量对比

Fig.13 Comparison of calculated and measured flow rates

2.6 临界淹没度

U形渠道的临界淹没度的定义为下游水位即将影响上游水位时闸门上下游水位之比。试验中通过调节下游尾门产生不同的淹没水位, 从而得到U形平板闸门的临界淹没度。

$$S = \frac{h_2}{h_1}, \quad (7)$$

式中: S 为临界淹没度; h_1 和 h_2 分别为临界状态下U形平板闸门上下游水位(m)。

不易产生自由出流。

3 讨论

本文根据U形渠道的横截面特征设计了U形平板闸门,在不同开度的闸孔出流试验中探索其过流能力。试验中发现闸后水流紊乱,水流与空气交互,脉动剧烈,形成旋滚,波动延伸至下游渠道两侧,形成2个侧向回流区,这一水流现象与Hager^[21]的研究结果一致。淹没出流时,闸后的 Fr 在收缩断面有最大值,小开度下流态属于部分淹没出流,此时水头损失较大, Fr_{max} 接近1.8,这一结论与郭永鑫等^[22]研究结论一致。量水设施的水头损失是评价其过流能力的重要指标,水头损失越小,量水设备的水力性能越优。U形平板闸门的平均相对水头损失为6.89%,小于圆头量水槽、抛物线形量水槽^[23-25],仅用弧形段过水时,闸门两侧出现堰流,避免了部分局部水头损失,且闸门一体多用,与闸门加专用量水设备的组合相比,没有增加水头损失。临界淹没度是流态判别的重要标准,临界淹没度较小,说明量水设备有较大的淹没出流范围,U形平板闸门的临界淹没度随流量和闸门开度的变化而变化,平均值为0.75,小于圆头量水槽^[23-24]。本研究的流量公式计算误差小于3.5%,与多种流量公式相比^[17-22],测流精度较高,侧面验证了U形平板闸门的实用性。

判别水流过闸时是堰流还是孔流,以过闸水流是否受到闸门控制来区分,传统经验认为平底坎上平板闸门的孔堰流分界点为 $e/H=0.65$ ^[26],有研究表明孔堰流分界点与流量系数有关,因而影响因素包括堰型、闸门形式和位置、变换方式等^[26-27]。对于闸底坎为平底时,孔堰流的临界值实际上有一定的变化范围,崔巍等^[28]基于严陵河闸实测数据,发现孔堰流分界点变化范围极大,最小值接近0.1,最大值达到0.991。本研究的临界相对开度 e/H 为1,此时水流刚好脱离闸门下缘,为点接触,横断面的水面接近水平,孔堰流分界点区别于已有的研究成果,这与U形平板闸门的体形、闸底坎等因素有关。

此外,本研究的U形平板闸门根据试验渠道横截面特征设计而成,其他规模尺寸的U形渠道可参照本文设计原则,制作相应的平板弓形闸门。U形平板闸门水头损失较低,投资较小,可实现测控一体,具有较强的实用性,配备电气设备即可实现灌区流量测量控制一体化,对U形渠道进行智能管理,避免人工粗放管理模式带来的人力投入大、用水量测精度误差大、管理混乱、数据无法共享等问题,应用前景广泛。此外,底坡也是影响渠道水流运动的重要因素^[24],对U形平板闸门不同底坡、断面尺寸和收缩比的过流特性尚需要进一步研究。

4 结论

1) 淹没出流的佛汝德数沿程分布规律较一致,上游 Fr 较稳定,临近闸前 Fr 降低,在闸后收缩断面有 Fr_{max} ,且随流量增大和开度减小而增大,随后 Fr 急剧减小,随着水流逐渐平顺而基本保持不变。

2) U形平板闸门孔堰流分界点不同于传统经验判定依据相对开度 $e/H=0.65$,临界相对开度随流量的增大变化极小,接近1,此时闸前水位与闸后水位基本相等。

3) 根据水力学经验公式回归分析得到了自由出流和淹没出流的流量公式,测流范围10~50 L/s内,计算值与实测值的相对误差小于10%,平均误差约为3%,满足灌区量水的精度要求。

参考文献:

- [1] 杨春蕾,蔡守华,王滇红,等.灌区量水技术发展历程及研究进展[J].灌溉排水学报,2017,36(S2):34-38.
YANG Chunlei, CAI Shouhua, WANG Dianhong, et al. Review on research of discharge measuring technique in irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(S2): 34-38.
- [2] 吴景社,朱凤书,康绍忠,等.U形渠道适宜量水设施及标准化研究[J].灌溉排水学报,2004,23(2):38-41.
WU Jingshe, ZHU Fengshu, KANG Shaozhong, et al. Research on the suitable flow measurement facilities and standardization for U-shaped channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 38-41.
- [3] 何武全,王玉宝,蔡明科.U形渠道圆柱体量水槽研究[J].水利学报,2006,37(5):573-577.
HE Wuquan, WANG Yubao, CAI Mingke. Cylinder flow measuring flume for U-shape channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 573-577.
- [4] 刘英,王文娥,胡笑涛,等.U形渠道圆头量水槽测流影响因素试验及模拟[J].农业工程学报,2014,30(19):97-106.
LIU Ying, WANG Wen'e, HU Xiaotao, et al. Experiment and simulation of factors affecting flow measurement of water-measuring column with round head in U-shaped channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 97-106.
- [5] 吕宏兴,刘焕芳,朱晓群,等.机翼形量水槽的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(9):119-123.
LYU Hongxing, LIU Huanfang, ZHU Xiaoqun, et al. Experimental research on airfoil-shaped flow flume[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 119-123.
- [6] 王文娥,张维乐,胡笑涛.U形渠道量水平板水力性能试验研究[J].农业工程学报,2019,35(13):84-90.
WANG Wen'e, ZHANG Weile, HU Xiaotao. Experimental study on hydraulic performance of water-gaging plate for U-shaped canal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 84-90.
- [7] SHAYAN H K, FARHOUDI J. Effective parameters for calculating discharge coefficient of sluice gates[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, 33: 96-105.
- [8] MOHAMED I M, ABDELHALEEM F S. Flow downstream sluice gate with orifice[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(12): 3 692-3 702.
- [9] STEIN R E. Design of hydraulic gates[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [10] 虞松宾,龙益辉,周士虎.广西郁江老口航运枢纽工程泄水闸坝门型设计方案选择[J].红水河,2011,30(5):39-42,62.
YU Songbin, LONG Yihui, ZHOU Shihu. Design plan selection of sluice gate dam type of Guangxi Yujiang Laokou navigation complex project[J]. Hongshui River, 2011, 30(5): 39-42, 62.

- [11] 王正中, 张雪才, 刘计良. 大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J]. 水力发电学报, 2017, 36(10): 1-18.
WANG Zhengzhong, ZHANG Xuecai, LIU Jiliang. Advances and developing trends in research of large hydraulic steel gates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 1-18.
- [12] 许中武, 蔡伟, 金晓华, 等. 不同类型闸门模态特性对比分析[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(3): 28-32.
XU Zhongwu, CAI Wei, JIN Xiaohua, et al. Comparative analysis on model characteristics of different types of gates[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(3): 28-32.
- [13] 赵强. 平板闸门测流及流场研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
ZHAO Qiang. Research on flow measurement and flow field of flat gate based on field test and CFD[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [14] 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.
- [15] KUBRAK E, KUBRAK J, KICZKO A, et al. Flow measurements using a sluice gate; analysis of applicability[J]. Water, 2020, 12(3): 819.
- [16] 叶云涛, 何建京. 宽顶堰平板闸门闸孔出流水力计算的实验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 138-141.
YE Yuntao, HE Jianjing. Experimental study on hydraulic calculation of discharge under plane gate on broad-crested weir[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(2): 138-141.
- [17] SILVA C O, RIJO M. Flow rate measurements under sluice gates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(6): 06017001.
- [18] FERRO V. Simultaneous flow over and under a gate[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(3): 190-193.
- [19] VAHEDDOOST B, SAFARI M J S, ILKHANIPOUR ZEYNALI R. Discharge coefficient for vertical sluice gate under submerged condition using contraction and energy loss coefficients[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 80: 102 007.
- [20] HEYDARI M, ABOLFATHI S, SHABANLOU S. Calibration of sluice gate in free and submerged flow using the simulated annealing and ant colony algorithms[J]. Journal of Applied Research in Water and Wastewater, 2018(9): 373-416.
- [21] HAGER W H. Hydraulic jump in U-shaped channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(5): 667-675.
- [22] 郭鑫鑫, 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.
- [23] 刘嘉美, 王文娥, 胡笑涛. U形渠道圆头量水柱的数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(1): 168-174.
LIU Jiamei, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Numerical simulation of water-measuring pillar with round head in the U-shaped channel[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(1): 168-174.
- [24] 刘英, 王文娥, 胡笑涛. U形渠道底坡对圆头量水柱测流的影响分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(7): 57-63.
LIU Ying, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Effect of bottom slope of U-shaped channel measurement with round head pier[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(7): 57-63.
- [25] 胡晗, 黄介生, 钱忠东. 抛物线形量水槽水力特性数值分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S1): 97-101.
HU Han, HUANG Jiesheng, QIAN Zhongdong. Hydraulic characteristics numerical analysis of parabolic flume[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S1): 97-101.
- [26] 杜屿, 杜占德, 王健. 孔堰流变换分界(e/H)值的综合分析[J]. 水文, 1992, 12(4): 28-33.
DU Yu, DU Zhande, WANG Jian. Analysis on transformation boundary of orifice flow and weir flow(e/H) [J]. Hydrology, 1992, 12(4): 28-33.
- [27] 张敬楼. 关于堰流和闸孔出流界限的讨论[J]. 江苏水利, 1987(4): 10-11.
ZHANG Jinglou. Discussion on transformation boundary of weir flow and orifice flow[J]. Jiangsu Water Resources, 1987(4): 10-11.
- [28] 崔巍, 吴鑫, 陈文学, 等. 大型渠道弧形闸门过流公式测试比较[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 141-146.
CUI Wei, WU Xin, CHEN Wenxue, et al. Comparison of different discharge calculation equations for large canal radial gates[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 141-146.

Experimental Study of Flow Characteristics Through Sluice Gates in U-Shaped Channels

HU Mingyu, WANG Wen'e*, HU Xiaotao, WANG Shilong, FAN Kai, LIU Dukun

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,

Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: 【Objective】 Flow measurement through sluice gates in U-Shaped channels depends on a range of factors. We experimentally measured the characteristics of flow through the gates under different designs and working conditions, and then derived a formula using these data to estimate flow rates based on hydraulic characteristics of the gate and channel, as well as the working conditions. 【Method】 The experiments were conducted by controlling the flow rates from 10 to 50 L/s. The critical ratio of orifice flow to weir flow, as well as the flow capacity were analyzed utilizing hydraulic parameters, including water surface line, Froude number, and water head loss across the gate. These parameters were used in the orifice flow formula to calculate the flow rate. 【Result】 The critical ratio of orifice flow to weir flow was close to 1, the Froude number was uniformly distributed along the flow path, and the average relative head loss across the gate was 7%. Compared to the measured data, the error of the derived formula was less than 3.5%. 【Conclusion】 The sluice gate for the U-Shaped channel works well, and water head loss across it is minor. The derived formula for calculating flow rate is accurate. These results are helpful for designing U-shaped channels in irrigation areas and calculating flow rates through them.

Key words: U-shaped channel; sluice gate; hydraulic characteristics; orifice flow; flow measurement

责任编辑: 赵宇龙