

U形渠道便携式板柱结合型量水槽水力性能研究

王玉宝^{1,2} 杨娟^{1,2} 李鑫^{1,2} 王文娥¹ 何武全¹

(1. 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;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对灌区小型渠道数目多、需测控的断面多、而宜采用的移动式量水设备仍不够完善的问题, 借鉴移动式薄板量水槽和圆柱量水槽的优点, 设计了一种便携式板柱结合型量水槽, 在分析量水槽测流机理的基础上, 开展原型试验和数值模拟研究, 并应用量纲分析法建立测流公式。结果表明, 量水槽具有较好的水位-流量关系, 上游壅水高度在 1.85 ~ 13.69 cm 之间, 临界淹没度在 0.70 ~ 0.91 之间, 槽前弗汝德数均小于 0.5; 板柱结合型量水槽比现有的圆柱量水槽和带尾翼的圆头量水槽体型小, 便携度高, 流线分布稍差, 上游壅水高度稍大, 临界淹没度稍低, 但能满足灌区测流要求; 量水槽测流精度高, 平均测流相对误差为 2.07%。

关键词: 量水槽; 板柱结合型; 便携式; U形渠道; 试验; 数值模拟

中图分类号: S274.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0322-09

Hydraulic Performance of Plate-column Portable Flume in U-shaped Channel

WANG Yubao^{1,2} YANG Juan^{1,2} LI Xin^{1,2} WANG Wene¹ HE Wuquan¹
(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Flow measurement facilities in channels are the basis for charging agricultural water according to water consumption. Because the number of small channels in irrigation districts is large, there are many sections to be measured. Therefore, mobile flow measurement facilities are recommended to measure the discharge. However, the existing mobile water measuring facilities are still not suitable enough. Combining the advantages of mobile thin plate flumes and cylindrical flumes, a plate-column portable flume was developed. Based on the analysis of the mechanism of flow measurement for the flume, prototype tests and numerical simulations of the plate-column portable flume were carried out. And the flow measurement formula was established by using the dimensional analysis method. The results showed a good relationship between water depth and flow rates in plate-column portable flumes. The upstream backwater height was between 13.69 cm and 1.85 cm, the critical submergence was between 0.91 and 0.70, and the Froude number Fr at the upstream of the plate-column portable flume was less than 0.5. The plate-column portable flume had a smaller shape than the existing circular flume and the flume with a round head and a empennage, and had a higher portability and a slightly worse streamline distribution; its upstream backwater height was slightly larger and its critical submergence was slightly lower, but that still can meet the requirements of the flow measurement in the irrigation area. The plate-column portable flume had a high accuracy that the average relative error of which was only 2.07%, and had the prospect of generalization and application.

Key words: water measuring flume; plate-column flume; portable; U-shaped channel; experiment; numerical simulation

收稿日期: 2018-12-24 修回日期: 2019-02-14
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0400205)、国家自然科学基金项目 (41871207) 和陕西省科技统筹创新计划项目 (2016KTZDNY-01)
作者简介: 王玉宝 (1975—), 男, 研究员, 博士, 主要从事灌区农业高 eff 用水研究, E-mail: wyb0406@sina.com

0 引言

我国是农业大国,农业用水量占全国总用水量的 60% 以上,节约农业用水有利于缓解我国水资源紧缺带来的压力^[1-4]。我国农业节水潜力的 50% 在于管理节水^[5-7],完善我国灌区量水设施、实现农业用水的精确计量是开展农业水价综合改革和实施最严格水资源管理制度等管理措施的基础^[4,8-9]。我国灌区小型渠道数目众多,量水设施缺乏,导致农业用水难以按量计费,仍普遍采用按公顷征收水费的方式,不利于提高农民节水积极性,造成灌溉水浪费严重^[10-11]。小型渠道中 U 形渠道占地面积小、防渗抗冻性能好,且具有较强的输水、输沙能力,在我国灌区应用广泛^[12-13]。

有关小型 U 形渠道量水方面的研究以固定式量水设备为主,主要有平底抛物线形量水槽^[14]、抛物线形喉口式量水槽^[15]、直壁槽式量水堰^[16]、机翼形量水槽^[17]、U 形喉道测流槽^[18]、三角形剖面堰^[19]和半圆柱形量水槽^[20]等。固定式量水槽在灌溉水泥沙含量低、渠道底坡坡度较大的地区使用效果较好。若设置在灌溉水泥沙含量较高、底坡平缓的渠道中,会使量水槽上游水位长时间壅高,流速放缓,造成泥沙不断淤积,导致测流精度和渠道过流能力下降,致使农户对小型渠道固定式量水设备的接受程度降低,并常造成对固定式量水设施的人为损毁。此外,灌区末级渠道需要测控断面多,采用固定式量水设施量水时建造成本高。

为克服固定式量水设施的缺陷,学者们提出了多种移动式量水技术,其中较常用的有流速仪测流、超声波测流和激光测流^[21-23]。也有一些学者开展了移动式量水槽的研究。移动式量水槽一般通过在渠道边壁或渠道中央安装量水设施来缩窄过水断面,形成临界流进行量水。如抛物线形移动式量水堰板^[24]是一种设置在边壁的量水槽,其测流误差小于 5%,结构简单、造价低,利于泥沙及漂浮物通过。由于 U 形渠道横断面形式多样,每种装在边壁上的量水设备仅适合特定的一种断面型式,且满足收缩比要求时其断面收缩程度较大,造成边壁式量水设施体型较大;而安装在中间的移动式量水槽,在满足收缩比(设置量水设备后,量水槽喉口面积与渠道断面面积之比)在适宜范围内的条件下,同一量水设备经率定后可适用于多种断面型式和结构尺寸的 U 形渠道^[25]。HAGER^[26]对圆柱形量水槽的过槽水流进行了理论分析,根据临界流原理推导出圆柱形量水槽分别用于矩形、梯形及 U 形渠道测流时的水

深-流量关系;何武全等^[27]在 HAGER 的研究基础上,对 U 形渠道圆柱体量水槽进行了理论和试验研究,提出了测流公式,相对误差为 3.78%;刘嘉美等^[28]基于圆柱绕流理论,在圆柱体的背水侧增设 V 形尾翼,提出了圆头量水柱;刘英等^[29]进一步进行了 U 形渠道圆头量水柱的研究,发现其水头损失比长喉道量水槽小,且小于同收缩比条件下的圆柱体量水槽。

以往研发的量水槽大多以流线型为参考设计,流线型量水槽可以有效减少水流与量水槽壁面分离,使水流更顺畅,减小水头损失和泥沙淤积,但需要一定的顺流长度,其便携程度还有较大的提升空间。为进一步提高量水槽便携程度,在吸收以往量水槽设计经验的基础上,本文提出一种体型尽可能小、且满足测流要求的板柱结合型量水槽,并通过原型试验和数值模拟对其水力性能进行研究。

1 材料与方法

1.1 结构设计与测流原理

1.1.1 结构设计

板柱结合型量水槽通过局部缩窄渠道过水断面面积,使过槽水流加速并产生临界流,形成稳定且单一的水位-流量关系,利用驻点水深计算过槽流量。便携式量水槽不需要固定在渠道中,测流时间短,不会造成泥沙淤积,因此对水头损失、壅水高度等指标的要求较低。由于便携式量水槽需要经常进行安装、拆卸和搬运,所以对便携程度的要求高,除了需要满足测流条件外,还要求结构简单、体型小^[30]。HAGER^[31]提出了“文丘里量水槽”,该量水槽由两块分别安装在矩形渠道两侧的薄板构成,结构简单、体型小。水流收缩程度随着量水槽宽度和量水槽相对长度的增大而增大^[32]。因此,量水槽需要有足够的宽度或者顺流长度才能使过槽水流达到临界流状态。量水槽的顺流长度对水流收缩程度的影响程度比其宽度小,增加顺流长度会造成量水槽体积大幅度增大,严重降低量水槽便携程度^[32]。理论上,满足测流条件的体型最小、结构最简单的量水槽就是在渠道中央放置一块与水流方向垂直的薄板。薄板量水槽的缺点是流线差,水头损失大,不易形成稳定的驻点水深,圆柱量水槽、带尾翼的圆头量水槽以及椭圆形量水槽(长轴与水流平行),在一定程度上避免了薄板量水槽的缺陷。

本研究结合薄板和圆柱各自的优点,提出了板柱结合型量水槽。该量水槽由一个圆柱体和分别位

于该圆柱两侧的两块薄板(圆柱体和薄板部分可移动,量水时置于渠道中间,减小过水断面以形成临界流),以及原 U 形渠道共同组成。量水槽的薄板部分可以有效地缩小量水槽尺寸,提高便携度;圆柱体部分可以改善量水槽流线分布情况,形成较稳定的驻点水深。

根据以往经验^[33],受水流脉动的影响,驻点水深存在一定的波动,且驻点区域的位置会随渠道底坡坡度的变化而改变,影响驻点水深量测精度,导致测流精度降低。为了进一步优化板柱结合型量水槽的结构,提高测流精度,本研究改进了驻点水深的量测方法。在量水槽迎水面前端钻一排小孔,使水流进入量水槽的圆柱内部,柱内水深波动极小,可通过圆柱内水深间接测得驻点水深。板柱结合型量水槽结构如图 1 所示。

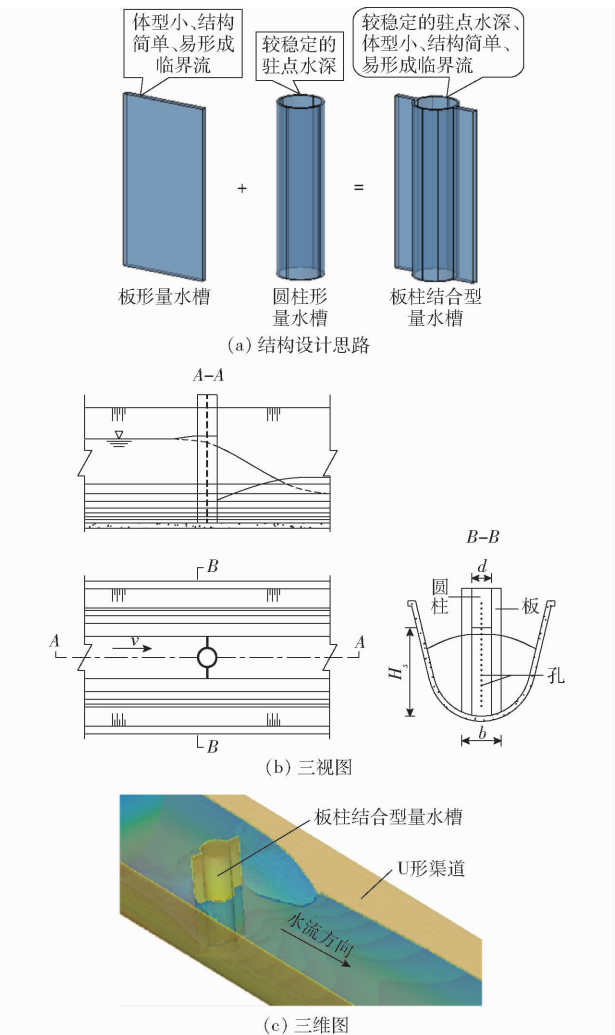


图 1 板柱结合型量水槽结构示意图

Fig. 1 Structure schematics of plate-column portable flume

1.1.2 测流原理

板柱结合型量水槽基于临界流原理测量过槽流量。将量水槽安装在渠道中央,通过局部缩窄渠道过流断面面积,使过槽水流加速并形成临界流,产生

不受下游水流影响的稳定且单一的水深-流量关系,达到最佳测流效果^[34-35]。结合能量守恒原理,通过驻点水深来计算过槽流量。

临界流断面的能量方程为

$$H_k = h_k + \frac{\alpha v_k^2}{2g} \tag{1}$$

式中 H_k ——临界流断面总水头(总能量),m
 h_k ——临界流断面水深,m
 v_k ——临界断面流速,m/s
 g ——重力加速度,m/s²
 α ——动能修正系数,取 1.0

临界流断面的弗汝德数 Fr 等于 1,即

$$Fr = \frac{v_k}{\sqrt{gh_k}} = 1 \tag{2}$$

$$Q = v_k A_k = A_k \sqrt{gh_k} \tag{3}$$

式中 Q ——计算过槽流量,m³/s
 A_k ——临界断面面积,m²

渠道断面形状尺寸及量水槽尺寸一定的情况下可由临界流断面水深 h_k 计算得到 A_k 。

理论上,在临界水深已知的情况下,可通过式(3)计算出过槽流量。但由于临界断面会随着流量、收缩比等因素的变化而发生改变,实际测量临界水深有一定的难度。因此结合能量守恒原理,通过上游总能量计算过槽流量。

假定上游断面至临界流断面的能量损失忽略不计,根据能量守恒有

$$H_1 = H_k = h_k + \frac{\alpha v_k^2}{2g} \tag{4}$$

式中 H_1 ——量水槽上游总水头(总能量),m
由式(2)、(4)可得

$$H_s = H_1 = h_k + \frac{1}{2} h_k = \frac{3}{2} h_k \tag{5}$$

式中 H_s ——驻点水深,m

式(5)表明上游总能量与临界水深具有一一对应的关系,而临界水深与流量具有一一对应的关系,因此可以通过上游总能量计算出过槽流量。板柱结合型量水槽安装后会在量水槽迎水面顶端形成驻点水深,理论上驻点水深与上游总能量相等,故本研究通过驻点水深来测量过槽流量。

由式(3)、(5)可得

$$Q = A_k \sqrt{\frac{2}{3} g H_s} \tag{6}$$

假设量水槽过流面积最小的断面为临界流断面。由于实际应用中该断面的水深一般大于渠道断面圆弧段的高度,本研究仅对水深高于圆弧段的情况加以讨论。

$$A_k = 2r \sin \frac{\theta}{2} \left[h_k - r \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \right] + \frac{r^2}{2} (\theta - \sin \theta) + m \left[h_k - r \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \right]^2 - A_b \quad (7)$$

其中 $A_b = b \left\{ h_k - \left[r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{b}{2} \right)^2} \right] \right\} + \left[r^2 \arcsin \frac{b}{2r} - \frac{br}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{2r} \right)^2} \right]$ (8)

式中 r ——U 形渠道圆弧段半径, m
 θ ——圆弧段中心角, rad
 m ——U 形渠道直线段边坡系数
 b ——量水槽宽度, m
 A_b ——量水槽在临界流断面处截面面积, m²
已知驻点水深 H_s 的情况下, 通过式 (5) ~ (8) 可计算出过槽流量。

1.2 试验装置与方法

1.2.1 试验装置

原型试验装置主要由供水管道、流量调节阀门、稳水池、试验渠道、板柱结合型便携式量水槽、渠道底坡坡度调节装置、尾门、尾水池等组成, 如图 2a 所示。通过泵房将蓄水池的水抽入供水管道, 利用阀门调节试验流量。水流经稳水池后流入有机玻璃 U 形渠道, 然后进入尾水池, 通过回水渠道流回蓄水池。供水管道段安装有电磁流量计、回水渠道段设置有三角形量水堰, 以量测试验流量。板柱结合型便携式量水槽的上、下游各处水位通过 SCM60 型水位测针测量, 精度为 0.1 mm。试验渠道为 U 形有机玻璃渠道, 渠长 12 m, 渠道综合糙率 n 取 0.011, 坡

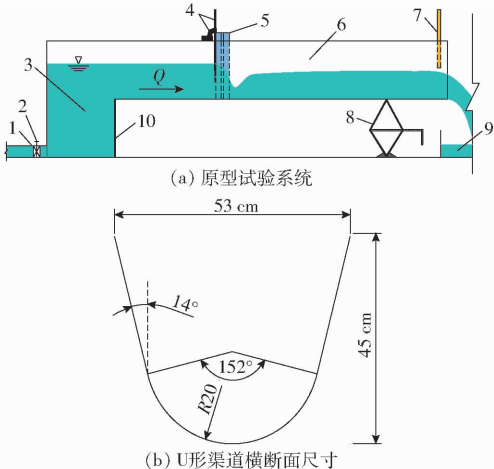


图 2 原型试验系统和有机玻璃 U 形渠道横断面尺寸示意图

Fig. 2 Prototype test system and cross section dimensions of plexiglass U-shaped channel

1. 供水管道 2. 流量调节阀门 3. 稳水池 4. 测针 5. 板柱结合型量水槽 6. 有机玻璃 U 形渠道 7. 尾门 8. 底坡坡度调节装置 9. 尾水池 10. 渠首支架

度可进行调节。渠道横断面参数如图 2b 所示。

1.2.2 试验方法

本研究在 5 个渠道底坡坡度 ($i = 1/500$ 、 $1/1\,000$ 、 $1/2\,000$ 、 $1/5\,000$ 、 0)、7 个流量 (15、20、25、30、35、40、45 L/s) 的工况下, 分别对 5 个不同收缩比 ($\varepsilon = 0.514\,2$ 、 $0.561\,1$ 、 $0.608\,5$ 、 $0.656\,4$ 、 $0.704\,8$) 的板柱结合型量水槽进行试验研究。通过调节底坡调节装置, 将渠道底坡坡度调整为试验坡度。按照试验装置图在渠道适当位置处安置好板柱结合型量水槽后打开水泵供水, 利用直角三角堰及电磁流量计监测渠道中的实时流量, 通过流量调节阀门调节流量至待测流量, 之后调整渠道尾门开度, 使水流处于自由出流状态, 按照编排好的控制断面顺序依次读出水位测针读数并记录读数和水流现象。最后减小渠道尾门开度, 通过调节测试使水流处于临界淹没状态, 记录上下游断面水深。

1.2.3 模拟方法

为了能够更加深入地分析安装量水槽后渠道中的水流状况, 根据模型试验的条件对量水槽上游 4 m 处至其下游 5 m 处之间的流场进行了仿真模拟。通过 AutoCAD 软件建立渠道及量水槽的三维模型, 如图 3a 所示, 并将模型导入 Flow 3D 软件对其流场进行模拟。根据板柱结合型量水槽的工作原理及特点, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 三维湍流模型进行数值模拟, 并采用有限差分法将模拟控制方程离散为代数方程组进行求解计算, 对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用二阶中心差分格式, 最小步长设为 10^{-6} 。TruVOF 计算方法只计算含有液体的单元而不考虑只含气体的单元, 很大程度上减少了模型收敛所需的时间, 对自由液面的描述更加准确。

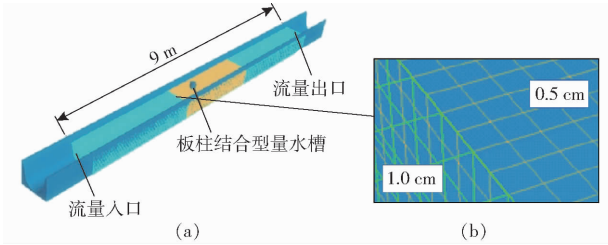


图 3 U 形渠道板柱结合型量水槽网格块及连接处网格划分放大图

Fig. 3 Schematics of grid division of model of plate-column portable flume in U-shaped channel

共采用 3 个网格块对整个流场区域进行划分, 由于量水槽附近的流场中各水力要素变化较剧烈, 为了逼真地模拟渠道流态, 同时减少计算时间, 划分该区域的网格块采用较小的网格尺寸, 如图 3b 所示, 单元网格长度为 0.5 cm, 该网格块上下游的网格块的单元网格长度均设置为 1.0 cm, 整个计算域

的网格总数为 430 万 ~ 550 万。

边界条件:上游进口设置为流量进口 (Volume flow rate),根据试验中的实际流量给定一系列流量的进口流量值,默认流体从整个边界开放区域流入,流动方向与边界垂直;下游出口设置为出流边界 (Outflow);渠道底部与侧壁均选择固壁边界 (Wall);渠道顶部空气入口设定为对称边界 (Symmetry),即默认无流体穿过该边界。

2 结果与分析

2.1 试验结果分析

2.1.1 测流公式及测流精度

测流公式决定量水槽的测流精度。以往量水槽测流公式多是基于平坡 ($i = 0$) 条件得到,但灌区渠道大多为正坡,且修建的平坡渠道在冻融循环的影响下其底坡也会发生改变。因此,应用基于平坡条件得到的流量公式会导致较大的测流误差^[36-37]。本研究通过回归分析,获得了适用于不同坡降、不同收缩比条件下的流量公式。影响量水槽过流条件的物理参数有:渠道底坡坡度、收缩比、驻点水深、量水槽喉口水面宽度和重力加速度。基于量纲分析原理,利用 SPSS 软件回归分析得到具有量纲和谐性的测流公式

$$Q = \begin{cases} 0.5786 \left(\frac{H_s}{B_c} \right)^{1.676} \varepsilon^{1.020} i^{12.818} B_c^{2.5} g^{0.5} & (i > 0, R^2 = 0.990) \\ 0.2537 \left(\frac{H_s}{B_c} \right)^{1.543} \varepsilon^{-0.108} B_c^{2.5} g^{0.5} & (i = 0, R^2 = 0.996) \end{cases} \quad (9)$$

式中 B_c ——板柱结合型量水槽喉口处水面宽度,m
 式(9)具有较高的计算精度(图 4),平均相对误差为 2.07%。当 $i > 0$ 时,测流相对误差均小于 10%,最大相对误差为 7.34%,最小相对误差为 -0.01%,其中 95% 的相对误差不超过 5%,平均相对误差仅为 0.22%;当 $i = 0$ 时,量水槽相对误差均小于 5%,最大相对误差为 4.30%,最小相对误差为 -0.18%,平均相对误差仅为 0.15%。表明板柱结

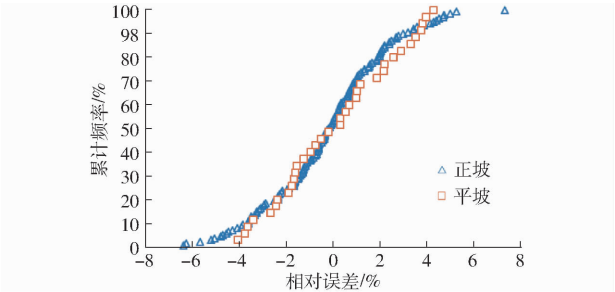


图 4 板柱结合型量水槽的测流相对误差累计频率
 Fig.4 Cumulative frequency of flow measurement relative errors for plate column combined flume

合型量水槽测流精度高,满足灌区测流要求。

2.1.2 壅水高度

过槽水流流经量水槽时,流线向渠道两侧弯曲,流速急剧增大、水位明显降低,在量水槽后方一定距离处汇合并形成水跃。由此产生的上下游水位差定义为量水槽的壅水高度。过大的上游壅水高度会增加渠道土方开挖量,导致投资加大。试验结果发现,上游壅水高度最大值为 13.69 cm,最小值为 1.85 cm,平均值为 5.52 cm。渠道底坡坡度、流量和收缩比均是量水槽壅水高度的影响因素。整体上,板柱结合型量水槽的壅水高度随量水槽收缩比的减小而增大,随渠道底坡坡度和流量的增大而增大,如图 5 所示(其他坡降或收缩比条件下的壅水高度变化规律与图 5 类似)。底坡较陡的渠道,水流流速较大,动能占总能头的比例较大,能量转化引起的壅水高度较大^[38];收缩比越小,量水槽阻水能力越大,上游壅水越高^[38]。因此,渠道底坡坡度较陡时适合应用收缩比较大的量水槽;渠道底坡坡度较缓时,可以选用收缩比较小的量水槽。以上游壅水高度不超过 10 cm 为标准,当渠道底坡坡度 $i \leq 1/1\,000$ 时,应采用收缩比 $\varepsilon > 0.5142$ 的量水槽;当渠道底坡坡度 $i \leq 1/500$ 时,应采用收缩比 $\varepsilon > 0.6085$ 的量水槽。

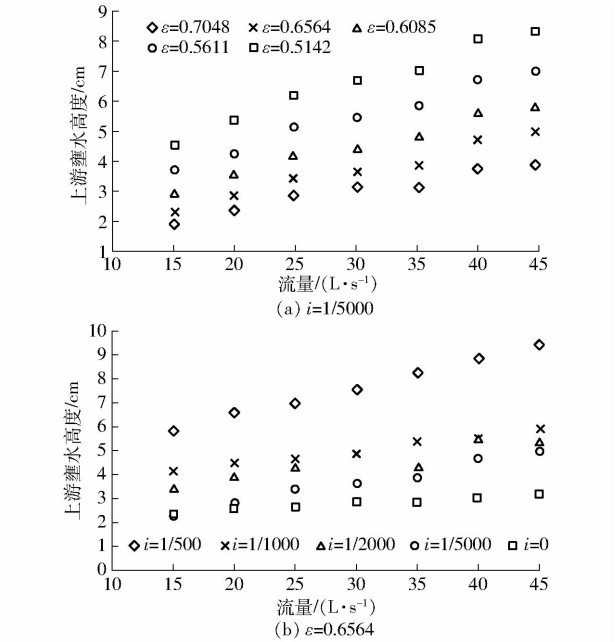


图 5 上游壅水高度与量水槽收缩比、渠道底坡坡度和过水流量的关系
 Fig.5 Relationship between upstream backwater height and contraction ratios, slopes of channel and flow rates

2.1.3 临界淹没度

临界淹没度是指收缩比、流量和渠道底坡坡度一定的条件下,量水槽下游水深刚好开始影响上游水深时下游水深与上游水深之比。临界淹没度反映

了能保证量水槽处于自由出流的下游水深的范围。试验通过调节渠道尾门得到不同的下游水深,对量水槽的临界淹没度进行测量。结果表明,临界淹没度最大值为 0.91,最小值为 0.70,平均为 0.80。临界淹没度与坡度没有明显的关系,总体上随收缩比的减小而减小,随流量的增大而增大,如图 6 所示

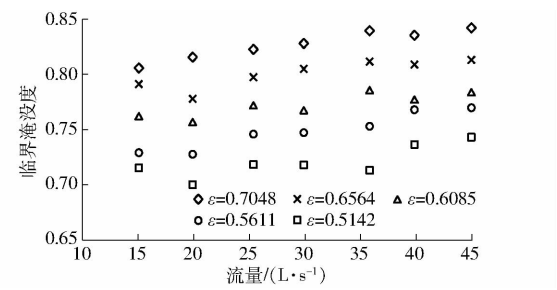


图 6 渠道底坡坡度 $i = 1/1\ 000$ 下的临界淹没度
Fig. 6 Critical submergence under condition of channel bottom slope $i = 1/1\ 000$

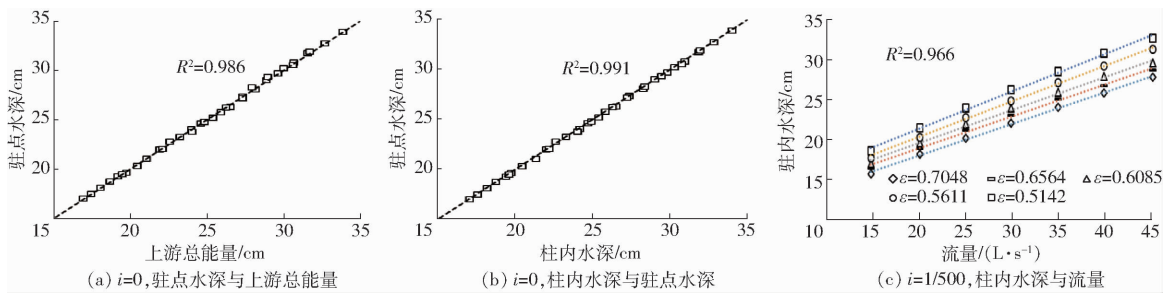


图 7 驻点水深与上游总能量、柱内水深、流量的关系

Fig. 7 Relationship between water depth of stagnation point and total energy of upstream, water depth in column and flow rates

2.1.5 槽前弗汝德数

槽前弗汝德数 Fr 是影响量水槽测流精度的重要因素之一。过大的槽前 Fr 可能导致量水槽上游水面产生较大波动,影响驻点水深测量的精确性,导致测流精度下降。一般要求明渠测流时槽前 Fr 小于 0.5。试验结果表明:量水槽收缩比越大,槽前 Fr 越大;收缩比相同的情况下,槽前 Fr 总体随流量的增大而增大,如图 8a 所示。当收缩比和流量一定时,渠道越陡,槽前 Fr 越大,如图 8b 所示。根据试验结果,板柱结合型量水槽的槽前 Fr 均小于 0.5,满足测流要求。其他坡降或收缩比条件下的槽前 Fr 变化规律与图 8 类似。

2.2 模拟结果

2.2.1 水面线

为验证模拟方法的可靠性,本研究原型试验中测量了驻点水深及板柱结合型量水槽上、下游若干断面处渠道中心线上的水深,并与模拟值进行对比分析。结果表明:当水流接近量水槽时,水深沿水流方向升高,在量水槽迎水面前端达到最大值,形成驻点水深;渠道中心线上的水深在量水槽下游侧最后端处最低,并沿水流方向不断增大,在量水槽下游侧

(其他坡降条件下临界淹没度的变化规律与图 6 类似)。

2.1.4 驻点水深

根据能量守恒定理,驻点水深与上游总能量相等,故可以利用驻点水深代替上游总能量来测流。试验结果证实,驻点水深与上游总能量的决定系数为 0.986,二者总体相等,如图 7a 所示。为了获得更加精确的驻点水深,本研究通过测量柱内水深间接得到驻点水深。理论上,柱内水深与驻点水深相等,试验结果证实二者决定系数等于 0.991,如图 7b 所示。与驻点水深相比,柱内水面波动极小,水深易测且受杂草、泥沙等的干扰小。因此,利用柱内水深间接测得驻点水深的方法可行、高效。试验结果表明柱内水深与流量之间具有良好的相关性。渠道底坡坡度为 1/500 时柱内水深与流量的决定系数为 0.966,如图 7c 所示。

一定距离处达到最大,之后水深基本沿程不变。模拟值和实测值吻合程度高,表明可以通过数值模拟的方法对板柱结合型量水槽进行研究,如图 9 所示。

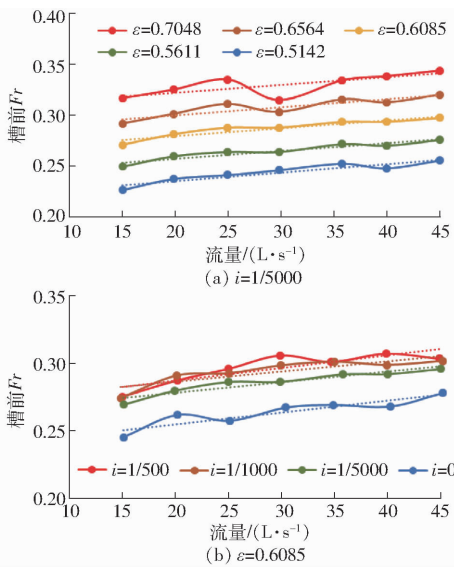


图 8 槽前 Fr 与渠道底坡坡度、收缩比、流量的关系
Fig. 8 Relationship between upstream Froude number and slopes of channel, contraction ratios and flow rates

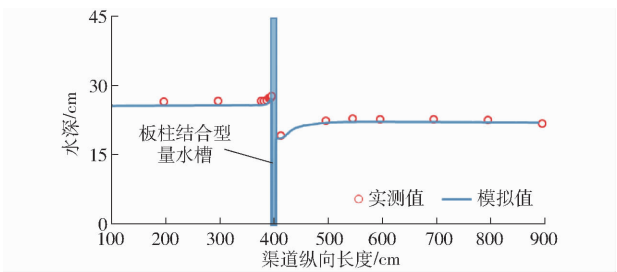


图9 设置板柱结合型量水槽后的渠道水面线
($i=1/2\,000$, $\varepsilon=0.608\,5$, $Q=35\,\text{L/s}$)

Fig.9 Water surface lines in channel after setting plate-column portable flume

2.2.2 流速分布

分析量水槽流场的流速分布对研究量水槽水力特性和优化量水槽结构具有重要意义。板柱结合型量水槽上游的水流流速较低,流速分布较均匀。在量水槽上游侧靠近量水槽的区域,随着水流不断地接近量水槽,渠道断面两侧的水流向渠道边壁收缩,流速不断增大,中间的水流流速不断降低。渠道断面中间的水流流速在量水槽迎水面最前端降为零;断面两侧的水流在量水槽板的外端与量水槽分离,之后继续向渠道两侧收缩,流速继续增大,在量水槽后方一定距离处达到最大。随后,过槽水流急剧扩散、交汇并形成水跃。经过水跃段水流质点不断混掺、碰撞,水流流速重新分布,最终恢复均匀,回到缓

流状态。图10为 $i=1/2\,000$ 、 $Q=35\,\text{L/s}$ 、 $\varepsilon=0.608\,5$ 下板柱结合型量水槽的沿程流速分布图。

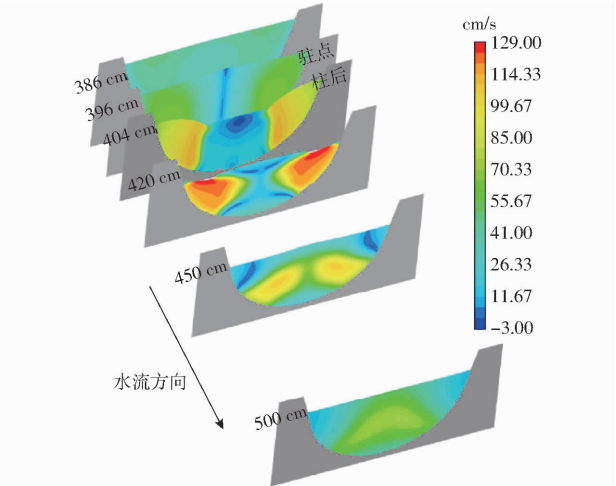


图10 板柱结合型量水槽的沿程流速分布

Fig.10 Velocity distribution along channel after setting plate-column portable flume

3 讨论

与其他几种移动式量水槽的水力性能进行对比发现:板柱结合型量水槽精度较高,仅次于带尾翼的圆柱形量水槽;其水头损失、上游壅水高度较其他移动式量水槽大;临界淹没度相对较低,便携度较高(表1)。

表1 不同移动式量水槽性能对比

Tab.1 Performance comparison of different mobile flumes

量水槽类型	收缩比 ε	上游壅水高度/cm	水头损失/%	临界淹没度	相对误差/%	特点	数据来源
圆柱形	0.570 0~0.690 0	≤ 10.00	/	0.73~0.84	≤ 3.78 , 平均 1.56	便携	文献[27]($i=0$)
带尾翼圆柱	0.500 0~0.700 0	≤ 5.00	(1.50~9.50)*	0.86~0.96	≤ 4.95 , 平均 0.10	便携	文献[40]($i>0$)
桥墩形	0.600 0~0.700 0	/	12.00~14.00	0.73~0.76	平均 2.44	较便携	文献[41]($i\geq 0$)
椭圆形	0.636 0	5.56	12.47	0.73	/	便携	文献[41]($i\geq 0$)
板柱结合型	0.514 2~0.704 8	1.85~13.69	14.95~24.22	0.75~0.83	平均 0.22	便携度高	本研究($i>0$)

注:“/”表示该文献中缺少对量水槽该项性能的研究或无法从文献中获得; * 为 $\varepsilon=0.560\,0\sim 0.750\,0$ 时的水头损失。

(1)测流精度

量水精度是评价量水槽性能的决定性指标。量水误差主要来源于渠槽系统修建过程中的施工误差和测流断面水位量测误差^[37,39]。与以往研究成果相比,板柱结合型量水槽通过柱内水深测量驻点水深,可有效避免槽前水面波动、水尺零点误差和渠道底坡坡度变化引起的驻点位置改变等带来的水位测流误差。同时,板柱结合型量水槽体型小、结构简单、安装简便,很大程度上减少了施工因素对测流误差的影响。板柱结合型量水槽的平均测流相对误差仅为2.07%,测流精度高于U形渠道机翼形量水槽(平均测流相对误差为2.58%)^[17],U形渠道半圆柱形量水槽(平均测流相对误差为3.55%)^[20]。刘

英等^[40]研制的带尾翼圆柱形量水槽制作和安装误差小,测流精度高,其测流相对误差最大值为6.22%,最小值为-0.01%,平均相对误差仅为0.1%。板柱结合型量水槽在正坡条件下的测流精度与带尾翼圆柱形量水槽相差不大,最大相对误差为7.34%,最小相对误差为-0.01%,平均相对误差为0.22%。带尾翼圆柱形量水槽结构较接近流线型,过槽水流顺畅,驻点处水深稳定;板柱结合型量水槽是非流线型结构,驻点处水深存在一定的波动。本研究通过柱内水深间接测得驻点水深,有效地减小了板柱结合型量水槽驻点处水深波动造成的测流误差。圆柱形和桥墩形量水槽不属于流线型结构,驻点水深存在一定的波动,直接测量驻点水深导

致其测流误差较大(表 1)。

(2) 壅水高度、水头损失、临界淹没度

与其他几种便携式量水槽相比,板柱结合型量水槽阻水能力较强,导致上游壅水高度较大;水流流线弯曲明显,局部水头损失较大。移动式量水槽只需在测流时临时安装在渠道中,测流时间一般不超过 5 min,虽壅水高度和水头损失较大,但不会出现泥沙淤积,渠道过水能力降低等问题。在流量较大时可选用收缩比较大的量水槽,以免上游水深超过渠道安全超高即可。板柱结合型量水槽的临界淹没度较圆柱形和带尾翼的圆柱形量水槽低,与桥墩形量水槽相差不大,可在较大范围内保证自由出流。

4 结论

(1) 借鉴薄板和圆柱形量水槽各自的优点,设计了一种 U 形渠道便携式板柱结合型量水槽,并结合连通器原理,改进了驻点水深的量测方法。该量水槽体积小,结构简单,易于制作、安装和拆卸,便携

程度高,具有良好的水位-流量关系,驻点水深容易获得,可临时安装在 U 形渠道中测流。测流精度较高,可满足灌区测流要求。在 $i>0$ 时测流相对误差均小于 10%,最大相对误差为 7.34%,其中 95% 的相对误差不超过 5%;当 $i=0$ 时,量水槽相对误差均小于 5%。

(2) 板柱结合型量水槽的壅水高度随收缩比的减小而增大,随渠道底坡坡度和流量的增大而增大。以上游壅水高度不超过 10 cm 为标准,当渠道底坡坡度 $i\leq 1/1\,000$ 时,宜采用收缩比 ε 大于 0.514 2 的量水槽;当渠道底坡坡度 $i\leq 1/500$ 时,宜采用收缩比 ε 大于 0.608 5 的量水槽。能在较大范围内保证自由出流,其临界淹没度总体上随收缩比的减小而减小,随流量的增大而增大,与坡度没有明显的关系。槽前 Fr 均小于 0.5,满足测流要求。

(3) 板柱结合型量水槽较现有的圆柱形量水槽、带尾翼的圆头量水槽、桥墩形量水槽和椭圆形量水槽体型更小,便携程度更高。其上游壅水高度稍大,临界淹没度稍低,但均能满足灌区测流要求。

参 考 文 献

[1] 尚松浩,蒋磊,杨雨亭. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10):81-92. SHANG Songhao,JIANG Lei,YANG Yuting. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(10):81-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.013. (in Chinese)

[2] SUN H, WANG S, HAO X. An improved analytic hierarchy process method for the evaluation of agricultural water management in irrigation districts of North China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 179: 324-337.

[3] 潘志宝,吕宏兴,张晓斐,等. 梯形渠道机翼形量水槽试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12):97-100. PAN Zhibao, LÜ Hongxing, ZHANG Xiaofei, et al. Experiment on airfoil-shaped measuring flume in trapezoidal canal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(12):97-100. (in Chinese)

[4] 党平,李进凯,陈金明. 农业水价综合改革稳步推进[J]. 水利发展研究, 2018,18(7):1-3,10. DANG Ping, LI Jinkai, CHEN Jinming. Comprehensive reform of agricultural water price has been steadily promoted [J]. Water Resources Development Research, 2018,18(7):1-3,10. (in Chinese)

[5] 楼豫江,康绍忠,崔宁博,等. 四川省灌溉管理节水发展水平综合评价模型构建与应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4):79-89. LOU Yuhong, KANG Shaozhong, CUI Ningbo, et al. Construction and application of comprehensive evaluation model for water-saving development level of irrigation management in Sichuan Province [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 79-89. (in Chinese)

[6] 杨红玲. 超声波流量计在大型灌区测水量水中与流速仪的比较应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008. YANG Hongling. The comparative application of ultrasonic flowmeter in measuring water quantity in large-scale irrigation area and flowmeter [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008. (in Chinese)

[7] 曾红颖. 发展的刻度:中国发展水平评价指标体系研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

[8] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 2013, 24(3):303-310. ZHANG Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. Re-understanding of water resources in Northern China[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese)

[9] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于推进农业水价综合改革的意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2016(6):47-50.

[10] 戚玉彬,张月云,罗江海. 小型 U 形渠道适宜量水设备浅析[J]. 中国农村水利水电, 2007(12):71-73. QI Yubin, ZHANG Yueyun, LUO Jianghai. Analysis of suitable water measuring equipment for small U-shaped channel [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(12): 71-73. (in Chinese)

[11] 冉聃颢,王文娥,胡笑涛,等. 梯形喉口无喉道量水槽水力性能分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(2):236-244. RAN Danjie, WANG Wene, HU Xiaotao, et al. Hydraulic performance analysis of a trapezoidal throat throat-free measuring flume [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 236-244. (in Chinese)

[12] 吴景社,朱风书,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. Study on the suitable water measuring facilities and standardization for U-shaped channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 38-41. (in Chinese)

[13] 杨士红,韩金旭,彭世彰,等. U 形渠道流速分布特性分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11):92-96.

- YANG Shihong, HAN Jinxu, PENG Shizhang, et al. Analysis and experiment of distribution properties and its application of velocity in U-shaped open channel[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 92 – 96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121117&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.017. (in Chinese)
- [14] U 形渠道量水设备试验研究课题组. U 形渠道平底抛物线形量水槽的研究[J]. 陕西水利, 1990(4): 16 – 19.
- [15] 吕宏兴, 朱晓群, 张春娟, 等. U 形渠道抛物线形喉口式量水槽选型与设计[J]. 灌溉排水学报, 2001, 20(2): 55 – 57.
- LÜ Hongxing, ZHU Xiaoqun, ZHANG Chunjuan, et al. Selection and design of parabolic throat measuring flume for U-shaped channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2001, 20(2): 55 – 57. (in Chinese)
- [16] 张志昌, 张宗孝, 刘亚菲. U 形渠道直壁槽式量水堰的试验研究与应用[J]. 陕西水利, 1992(1): 27 – 32.
- [17] 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.
- LÜ Hongxing, LIU Huanfang, ZHU Xiaoqun, et al. Experimental study on wing-shaped measuring flume [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 119 – 123. (in Chinese)
- [18] 尚民勇. U 形长喉道量水槽的试验研究及其应用[J]. 陕西水利, 1991(3): 41 – 44.
- [19] 邢光华, 段小五. 三角剖面堰在 U 形渠道的应用[J]. 陕西水利, 1989(2): 28 – 31.
- [20] 王时龙, 陈新明. U 形渠道半圆柱形量水槽水力特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(2): 169 – 172.
- WANG Shilong, CHEN Xinming. Hydraulic characteristics of semi-cylindrical measuring flume with U-shaped channel [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(2): 169 – 172. (in Chinese)
- [21] 王长德. 量水技术与设施[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [22] 韩俊马. 超声和激光结合的实时在线测流技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- HAN Junma. Research on real-time on-line flow measurement technology by combining ultrasound and laser [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [23] 郭蓉蓉. 明渠便携式超声波测流技术的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- GUO Rongrong. Research on portable ultrasound flow measurement technology in open channel [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [24] 朱风书, 马孝义, 朱晓群, 等. U 形渠道抛物线形移动式量水堰板研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 36 – 40.
- ZHU Fengshu, MA Xiaoyi, ZHU Xiaoqun, et al. Study on parabolic mobile weir plate for U-shaped channel [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 36 – 40. (in Chinese)
- [25] PERUGINELLI A, BONACCI F. Mobile prisms for flow measurement in rectangular channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(3): 170 – 174.
- [26] HAGER W H. Modified Venturi channel[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1985, 111(1): 19 – 35.
- [27] 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. Cylindrical measuring flume of U-shaped channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 573 – 577. (in Chinese)
- [28] 刘嘉美, 王文娥, 胡笑涛. U 形渠道圆头量水柱试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(11): 98 – 100.
- LIU Jiamei, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Experimental study on circular head measuring water column of U-shaped channel [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(11): 98 – 100. (in Chinese)
- [29] 刘英, 王文娥, 胡笑涛, 等. U 形渠道圆头量水柱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 influencing factors of flow measurement with round head in U-shaped channel [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 97 – 106. (in Chinese)
- [30] FERRO V. Simple flume with a central baffle[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 52: 53 – 56.
- [31] HAGER W H. Venturi flume of minimum space requirements[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1988, 114(2): 226 – 243.
- [32] HAGER W H, PIERRE-ANDRÉ D. Discharge characteristics of local, discontinuous contractions[J]. Journal of Hydraulic Research, 1987, 23(5): 421 – 433.
- [33] ANDREAS K, HAGER W H. Mobile flume for pipe flow[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(1): 19 – 23.
- [34] CHOW V T. Open-channel hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [35] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [36] SAMANI Z, JORAT S, YOUSAF M. Hydraulic characteristics of circular flume [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(4): 558 – 566.
- [37] HEALY L H, ONTKEAN R L. Impact of non-level operation of a circular flume on discharge measurement[C] // CSBE/SCGAB 2015 Annual Conf., Canadian Society of Bioengineering, Ottawa, 2015.
- [38] 郭志学, 苏扬中, 彭清娥, 等. 堆积体对不同比降河流壅水影响研究[J]. 工程科学与技术, 2012, 44(5): 13 – 18.
- GUO Zhixue, SU Yangzhong, PENG Qing'e, et al. Effect of accumulation body on backwater of rivers with different specific gradient[J]. Advanced Engineering Sciences, 2012, 44(5): 13 – 18. (in Chinese)
- [39] 马孝义, 王文娥, 吕宏兴, 等. U 形渠道量水槽的性能分析与筛选研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 44 – 49.
- MA Xiaoyi, WANG Wen'e, LÜ Hongxing, et al. Performance analysis and screening of U-shaped channel flume [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 44 – 49. (in Chinese)
- [40] 刘英. U 形渠道圆头量水柱水力性能及标准化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- LIU Ying. Study on hydraulic performance and standardization of U-shaped channel round head measuring water column [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [41] 蔡勇. 灌区新型量水槽结构形式优化及测流计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- CAI Yong. Research on structural optimization and flow measurement calculation method of new type measuring flume in irrigation area [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)