

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.011

堰槽组合设施测流机制试验研究

王文娥, 廖伟, 陈土成, 王惠, 胡明宇, 胡笑涛

(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: 山区季节性溪流流量变化大, 已有灌溉渠道量水设施难以在较大流量范围内均达到测流精度要求, 本文以克伦普堰和排淤量水槽组合而成的堰槽组合量水设施为试验对象, 通过试验探究其测流机制。根据流量在 5~79 L/s 范围内的概化水槽水力性能试验, 分析不同流量下的水面线、弗劳德数、垂线纵向时均流速、薄水层特征长度和特征宽度的变化, 建立不同流量阈值范围内的测流公式。结果表明: ① 随流量的增大, 堰槽组合设施流动形态从槽内流变为堰流, 流量阈值对应的阈值相对水深为 0.885, 拟合得到组合设施槽内流和堰流的测流公式, 与实测流量对比, 相对误差小于 3%。② 组合设施槽内流和堰流水力特性不同, 槽内流时槽内各测点纵向时均流速、薄水层的特征长度和特征宽度以及综合流量系数均随着流量增大而增大; 堰流时, 排淤量水槽槽内前段各测点纵向时均流速随着流量增大而减小, 后段各测点纵向时均流速随着流量增大而增大, 槽内收缩扭面段中部附近断面平均流速大小一致。③ 堰槽组合流量系数随着流量增大而减小。④ 堰槽设施下游薄水层的特征长度和特征宽度随着流量增大有下降趋势, 最大值均出现在流量阈值情况下。本研究有效解决了流量变幅较大的明渠测流设施匮乏问题, 可为山区季节性溪流测流设施应用提供参考。

关键词: 堰槽组合; 流量测量; 山区季节性溪流; 流量阈值; 阈值水位

中图分类号: TV8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2021)06-0922-11

堰槽组合测流设施是一种新型的测量和控制河流流量的建筑物, 多横跨河道修建, 由量水槽和量水堰组合而成, 具有监测河道流量、抬高上游水位、改善河道生态连通性、促进和维持河道稳定性等功能^[1-3]。随着河流水资源持续开发利用, 原有河道生态系统的发育和演变均发生了不同程度的改变, 影响着区域生态平衡和人类生活质量^[4]。为更加合理地开发利用河流水资源, 需通过对河流流量的监测和调控, 为水利工程设计、水资源利用及自然灾害治理等提供水文数据, 以维护和改善河流生态环境。

目前野外河流量水技术主要分为接触式量水技术和非接触式量水技术 2 种^[5]。其中, 接触式量水技术通过测量流速、面积等要素计算流量, 对测量外部环境要求高, 测量仪器需定期维护, 运行成本高, 该方法多运用于大型河流水文站。中小型河流一般采用非接触式量水技术, 比如降面积法、量水建筑物法、雷达法、粒子图像法等^[6]。雷达法、粒子图像法等表面流速法对测量条件敏感, 易受测量角度和外界风载等因素影响, 在低速范围内存在较大误差^[7]; 量水建筑物法由于不受人为因素和外部条件影响, 只需架设水位测量雷达和信号传送器, 很容易实现野外恶劣环境下流量远距离的实时监测, 具有很强的推广价值。常见的量水建筑物有量水槽和量水堰, 其中量水堰的几何形状繁多, 根据在野外河流中的作用不同有着不同的名称, 例如潜水堰、石头堰、拦水堰等^[8]。Piton 和 Recking^[9]通过研究拦水堰对山区溪流的推移质输沙和水流特性的影响, 发现拦水堰改变了河流中自然侵蚀和泥沙传播规律, 在洪水过程中, 起到输沙调节功能; Dust 和 Wohl^[10]采用室内模型试验和野外测量相结合的方法, 研究了山区溪流中不同形态连续堆石堰的过流状态, 并指出堆石堰中间隙流、堰流和振荡流 3 种流态的分界限, 表明只要在堰流范围内, 可以得到水位与流量的

收稿日期: 2021-01-02; **网络出版日期:** 2021-07-21

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20210720.1704.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079113); 陕西水利科技计划资助项目(2021slkj-8)

作者简介: 王文娥(1975—), 女, 河南孟州人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水工水力学方面研究。

E-mail: wangwene@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 廖伟, E-mail: 875517412@qq.com

稳定关系; Baki 等^[11]通过对堆石群堰进行数值模拟试验, 探究平面布置形式、池间距离以及堆石粒径大小等因素对于群堰水力特性的影响, 提出了基于堰前水深、堰长和池间距离的流量公式, 能够很好地预测堆石堰最大流速是否满足鱼类洄游的要求。国内外学者主要围绕量水堰的生态、拦淤消能等其他功能展开研究工作, 而对拦水堰在野外河流中的量水功能研究甚少^[12-16]。在实际中, 由于量水槽测流机制和量程范围小等特点, 多被应用于农田灌区, 王文娥等^[17]、冉聘颀等^[18]针对各类型的量水槽进行了体型结构优化研究, 以达到减少测流水头损失和防淤等效果。基于野外河流中量水堰堰前淤积问题, Wessels 和 Rooseboom^[1]提出在量水堰上加上排淤量水槽, 使复合量水堰具有良好输沙排淤特性, 同时这种堰槽组合测流设施在南非河流域进行了有效推广。目前, 关于量水堰和量水槽的研究, 大多数是把堰和槽独立研究, 而关于堰槽组合测流设施的研究甚少。

为更好推广堰槽组合测流设施在中国山区季节性溪流中的应用, 本研究基于克伦普堰和排淤量水槽组合测流设施, 进行概化水槽试验, 深入探究其测流机制及水力特性, 建立不同过流情况下测点断面水深与流量的关系, 以为堰槽组合测流设施提供一定的理论参考价值。

1 堰槽组合试验概况

1.1 水槽系统与测量系统

试验在西北农林科技大学北校区水工厅进行。试验装置由供水系统、流量监测系统、试验水槽和回水系统组成。其中供水系统和回水系统包括地下水库、平水塔、水流输送管道、流量控制阀门及混流泵等。流量采用电磁流量计和三角堰进行测量, 其中电磁流量计测量范围 0 ~ 150 L/s, 精度误差 $\pm 1\%$ 。试验水槽为矩形断面水槽, 长 14 m, 宽 1.5 m, 深 0.5 m, 表面为水泥光滑抹面。试验水槽首部设置进水前池和稳流栅墙, 起到消能稳水效果, 使水流平稳进入试验段, 出口采用栅板式尾门。试验通过流量调节阀门进行流量控制, 水深通过 SCM60 型水位测针进行测量, 精度 ± 0.1 mm; 流速通过 LS300-A 型便携式流速仪进行测量, 测量误差为 1.5% 以内, 采样时间为 60 s。

1.2 堰槽组合体型参数与试验方案

堰槽组合设施由排淤量水槽和克伦普堰组成, 其中排淤量水槽由分水段、矩形段、收缩过渡扭面段和梯形窄段 4 个部分组成, 整个槽底平坦, 梯形窄段底部宽度(b)为 25 cm, 槽深(d)为 $0.6b$, 采用有机玻璃制作, 分水段隔墙迎水面呈 45° 斜坡的半圆柱状, 隔墙厚度(s)为 4 cm, 已有研究^[1]表明 45° 隔墙能够起到很好的分水排淤效果。两侧克伦普堰迎坡面为 1:2, 背水坡面为 1:5, 具有水面线过渡平顺特点^[19], 采用聚氯乙烯板制作而成, 堰高(P)与槽深相同, 堰宽 $1.8b$ 。整个堰槽组合装置将试验水槽进行 3 等分, 克伦普堰单堰长 46 cm, 排淤量水槽入口宽 50 cm, 总长为 90 cm, 其他体型参数详见图 1。

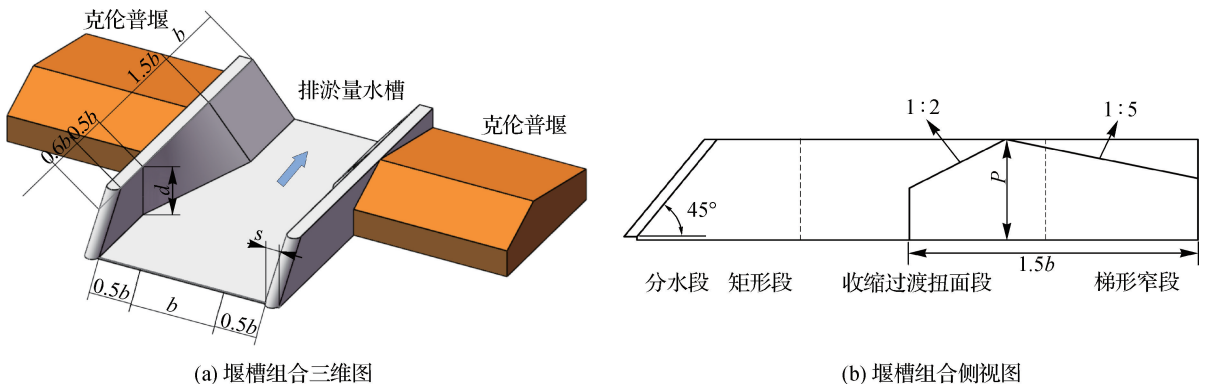


图1 堰槽组合体型参数

Fig.1 Weir and flume combination body shape parameter diagram

试验设置 17 种流量工况, 流量范围 5 ~ 79 L/s。根据堰槽内外水流结构和堰槽组合装置形状, 将水位测点布置划分成 4 个区域: 堰槽上游区域 26 个测点 (M1—M6、L1—L10 和 R1—R10)、堰槽下游薄水层区域 5 个测点 (S1—S5)、尾部区域 3 个测点 (w1—w3)、排淤量水槽槽内区域 12 个测点 (1—12) 和出口附近 5 个测点 (13—17), 测点布置如图 2, 排淤量水槽槽内控制断面位置详见表 1。每个试验工况, 待流量稳定、水位测量完毕后, 用 LS300-A 型便携式流速仪测量排淤量水槽内中轴线上流速分布, 以计算垂线平均流速。整个试验均在自由出流条件下进行。

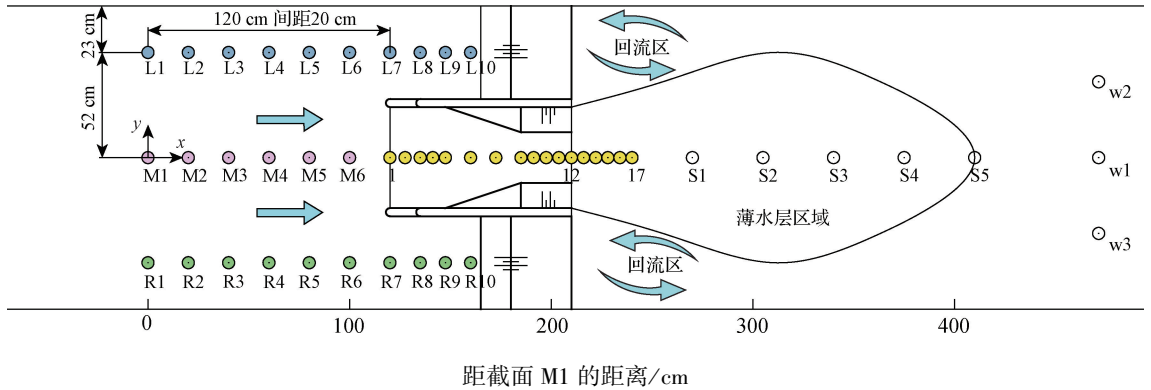


图 2 堰槽组合设施水深测点布置

Fig. 2 Layout of measuring points of the weir-flume combination facility

表 1 排淤量水槽槽内控制断面位置

Table 1 Control the section position in the sluicing flume

截面序号	距截面 M1 的距离/cm	截面序号	距截面 M1 的距离/cm	截面序号	距截面 M1 的距离/cm	截面序号	距截面 M1 的距离/cm
1	120.00	6	160.00	10	197.50	14	220.00
2	127.50	7	172.50	11	203.75	15	225.00
3	135.00	8	185.00	12	210.00	16	230.00
4	141.25	9	191.25	13	215.00	17	235.00
5	147.50						

注: 截面 1 为量水槽进口断面; 截面 5 为扭面开始断面; 截面 8 为梯形窄段开始断面; 截面 12 为量水槽出口断面。

2 水力特性分析

季节性河流流量范围受降雨影响较大, 当流量较小时, 全部流量均可通过河道主槽流动, 流量较大时, 将从主槽内漫溢到河滩, 堰槽组合设施与此类似。图 3 为不同流量范围内堰槽组合设施的过流情况, 当流量在一定范围时, 将全部通过量水槽流动, 两侧堰顶无溢流, 如图 3(a); 当流量继续增加、水深超过堰顶高度时, 水流将同时从量水槽内和两侧堰顶通过, 如图 3(b), 故将量水槽槽内流与堰流的临界流量称为流量阈值。槽内测点 4 的水深(h_4)与过槽流量具有稳定关系, 以该点水深与槽深的比值得到量纲一相对水深(h_4/d), 流量阈值对应的值称为阈值相对水深。由于出现堰流后, 过流断面的宽度突然增加, 水深和流量关系与槽内流时发生变化, 需要确定该流量阈值。通过试验发现, 本文堰槽组合设施在流量 $Q > 32.75$ L/s 时, 两侧堰顶开始过流, 同时排淤量水槽侧壁出现漫流, 因此, 该组合设施的流量阈值为 32.75 L/s, 对应阈值相对水深 $h_4/d = 0.885$, 可作为判断过流方式的标准。以下将对堰槽组合设施整体水流流动特点及槽内流和堰流进行分别讨论。

2.1 水面线

水流通过堰槽组合时, 受到排淤量水槽侧向收缩的影响, 中垂线上的水面线发生明显变化。图 4 为不同

流量情况下, 渠道试验段(测点 M1—M6、1—17 和 S1—S5)中垂线上水深变化情况, 横坐标为各测点距测点 M1 的距离(L), 纵坐标为各测点处水深(h)。结合图 3 和图 4 可以明显发现, 在排淤量水槽进口前区域(测点 M1—M6)水面平稳, 波动较小; 当水流进入排淤量水槽时, 在矩形断面段内(测点 1—5)水面有轻微下降, 同时由于量水槽隔墙迎水面为倾角 45° 的半圆柱状, 水流得到平稳过渡, 进入到排淤量水槽内, 在水面产生轻微的水翹; 在扭面段(测点 5—8)内水面开始出现明显跌落; 在梯形断面段(测点 8—12)内水面下降最快, 水流由缓流状态变至急流状态, 并产生临界流。当水流流出排淤量水槽时, 受到出口突扩的影响, 在下游出现薄层水区域, 两侧水深、中间水浅情况。在流量阈值以内, 两侧堰下出现回流区; 当流量大于阈值时, 堰下出现水流冲击区域。同时, 在不同流量情况下, 薄水层区域后出现不同程度的水跃情况。对薄水层区域水深变化进行分析发现, 在薄水层前段区域内, 水深随着流量增大; 在薄水层中部区域, 水深沿程分布紊乱; 随着沿程距离增大, 在薄水层尾部区域, 水深分布基本恢复到之前水深分布规律。这是由于在不同流量下, 水面翻滚区形成的位置不同造成的。

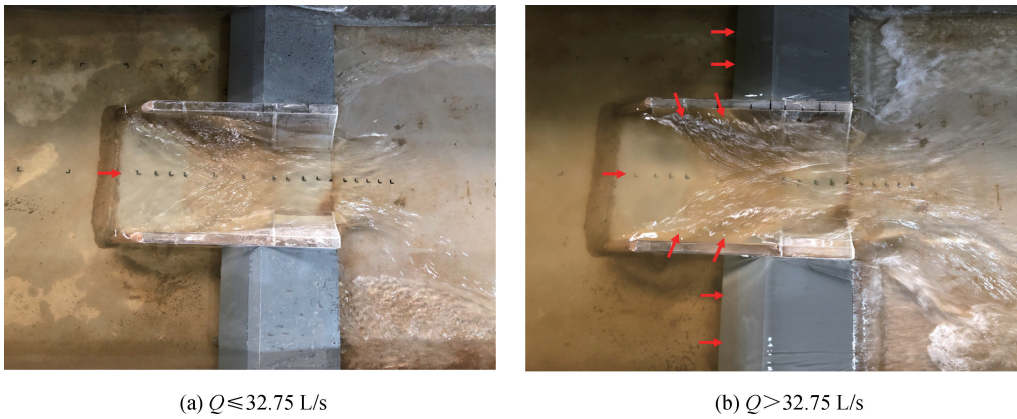


图3 堰槽组合测流设施过流流态

Fig. 3 Flow pattern of the weir-flume combination facility

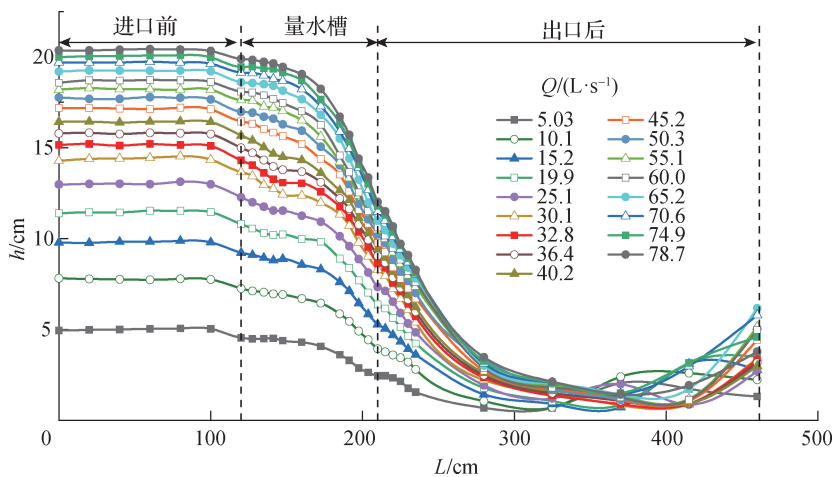


图4 量水槽中垂面水深沿程变化

Fig. 4 Water depth changes along the way

2.2 弗劳德数及临界水深断面位置

弗劳德数(Fr)是判别明渠流流态的一种重要参数, 可根据 Fr 的大小来判断急流、缓流和临界流出现的位置^[5]。根据两侧克伦普堰过流与不过流情况, 选择 2 种 Fr 计算模式。流量在阈值流量以内, 采用断面平

均流速来计算 Fr (式(1)); 流量大于流量阈值时, 两侧克伦普堰同时过流, 无法采用流量除以过流面积的方式计算断面平均流速, 则采用旋浆式流速仪测量垂线流速分布, 通过计算垂线平均流速来计算 Fr (式(2))。

$$Fr = \frac{\bar{v}}{\sqrt{gh}} = \frac{Q}{A \sqrt{gh}} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{\bar{v}_{\text{ver}}}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

式中: \bar{v} 为断面平均流速, m^3/s ; g 为重力加速度, 取为 9.81 m/s^2 ; Q 为试验渠道过流流量, m^3/s ; \bar{h} 为断面平均水深, m ; A 为过流面积, m^2 ; \bar{v}_{ver} 为中垂线平均流速, m/s 。

图5(a)为阈值流量范围内, 断面平均 Fr 的沿程分布情况, 图中标注断面为测点所在断面。由图5(a)得知, 在排淤量水槽进口前段($0 \sim 100 \text{ cm}$) Fr 值波动较小, 保持在 0.1 左右; 当水流进入到排淤量水槽时, 过流断面突然减小, 断面流速迅速增大, 导致 Fr 急剧增大, 由 0.1 增加到接近 0.4 ; 在排淤量水槽内的 Fr 沿程增大, 在扭面过渡段和梯形断面段内, Fr 增加速率较大; 在矩形断面段内, Fr 增加缓慢。根据量水水位测点选取标准, 要求选取测点的 $Fr < 0.5$ ^[5]。通过图5(a)的 $Fr = 0.5$ 划线可知, 测点 M1—M6 和测点 1—6 均满足水位测点的要求。图5(b)为阈值流量以外中垂线上的垂线 Fr 沿程分布情况。由图5(b)得知, 槽内 Fr 沿程分布情况与流量阈值流量内的分布情况相似, 量水槽后段 Fr 增加速率大于量水槽前段增加速率。由 $Fr = 0.5$ 划线可知, 在 36.4 L/s 、 40.2 L/s 和 45.2 L/s 工况下, 测点 1—5 满足水位测点的要求; 在其余工况下, 测点 1—6 满足水位测点要求。

由图5(a)中 $Fr = 1.0$ 可知, 临界水深断面出现在排淤量水槽梯形断面段内测点 9—11 之间。为获得准确临界水深断面位置变化规律, 采用差值计算和局部放大的方法, 获取临界水深断面位置。图5(a)中发现, 在阈值流量以内, 临界水深断面位置随着流量增大逐渐往后推移; 而在图5(b)中发现, 在阈值流量外, 槽内临界水深断面均出现在梯形断面段内测点 10—11 之间(距进口 $0.86L \sim 0.93L$), 但通过局部放大图可以发现, 临界水深断面位置并没有完全随着流量增大而往后推移, 分布较紊乱。

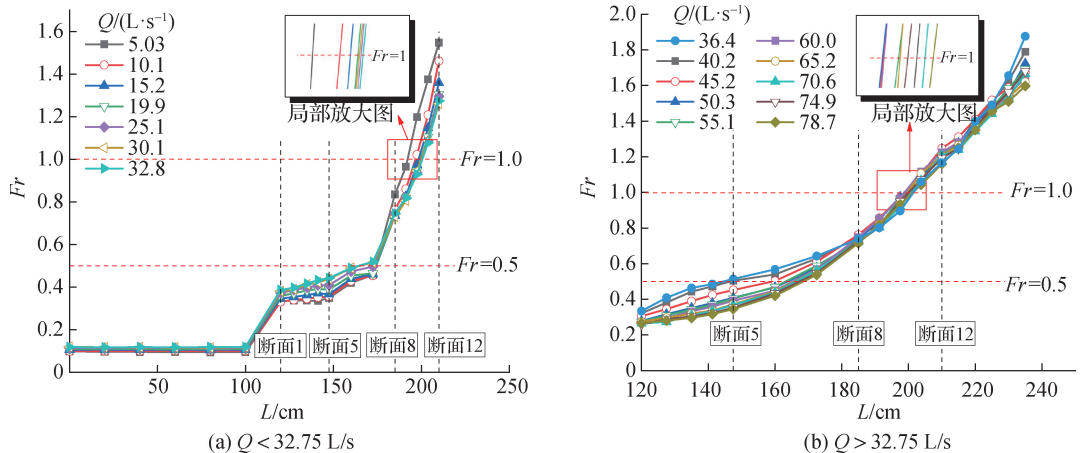


图5 不同流量下弗劳德数沿程变化

Fig. 5 Distribution of Froude number along the path under different flow rates

2.3 垂线流速分布及薄水层区域

当流量大于流量阈值时, 量水槽侧壁和克伦普堰堰顶同时过流, 部分水流会从侧壁流入量水槽内, 使槽内流速分布发生变化, 本文使用旋浆式流速仪测量了槽内中垂线上的纵向时均流速分布, 并绘制不同流量下垂线平均流速沿程分布图, 如图6。由图可知, 槽内垂线流速都满足沿程逐渐增大的规律。在阈值流量范围内, 每个测点流速随着流量的增加而增大。但当流量大于阈值流量时, 发现在扭面过渡段断面7附近, 不同

流量下沿程流速分布线会交汇于此处, 即流速大小一致; 在断面1至断面6之间, 各测点垂线流速随着流量增加而减小, 最大流速出现在阈值流量工况下, 最小流速出现在流量为78.7 L/s工况下; 在断面8至断面17之间, 各测点垂线流速随着流量增加而增大, 最大流速出现在流量为78.7 L/s工况下, 最小流速出现在阈值流量工况下。这是由于水流进入排淤量水前, 水流被量水槽侧壁分成3股水流, 一部分直接通过量水槽内部通过, 其余两部分则通过克伦普堰流向下游, 这导致流量越大, 量水槽进口段所分得流量越少, 流速就越小。但侧壁外侧的水流受到克伦普堰阻碍作用, 动能迅速减小, 而势能迅速增加, 致使外侧水位抬高, 当水位高于侧壁高程时, 就会翻越侧壁流向槽内, 使槽内流量增加。随着沿程距离增加, 流向槽内的流量就越大, 垂线平均流速逐渐增大。在试验中也发现, 同一断面情况下, 侧壁外侧水深大于槽内水深。

水流流出排淤量水槽时, 受到断面突扩影响, 水流冲击堰槽后区域, 向四周扩散, 形成不同方向上的水跃。根据水力学中跃前断面的定义, 将整个堰槽装置后出现的跃前断面连线区域定义为薄水层区域。薄水层具有 $Fr > 1.0$ 、流速大、水深较小等特点, 对河床具有很强的冲刷作用。本试验测量不同流量下薄水层区域的特征长度(纵向最长长度, L_a)和特征宽度(横向最长长度, L_b), 图7给出了薄水层区相对长度 L_a/B 、相对宽度 L_b/B 随流量的变化(B 为试验水槽宽度, $B=1.5$ m)。由图7可知, 在阈值流量以内, L_a 和 L_b 随着流量增大而增大; 当流量大于阈值时, L_a 逐渐减小, 而 L_b 呈现出随着流量先减小后增大再减小趋势。在阈值流量下, 出现特征长度最大值($1.67B$)和特征宽度最大值($0.7B$)。这是由于当侧堰过流时, 两侧水流流量增大, 挤压中间水流, 使特征宽度变小。同时, 从侧堰流出的水流, 在短距离内很快就从急流变成缓流, 完成水跃。完成水跃后的水体流速较慢, 阻碍中间急流的继续扩散, 导致特征长度变短。在实际山区河流中, 由于堰后冲刷比较严重, 通常会在堰后造成一个冲坑, 形成水垫。为避免冲刷破坏, 会以一定间距在河道或溪流上连续修建石头堰, 形成一定水垫避免河床冲刷破坏^[20]。所以, 堰槽组合装置在实际修建当中, 可以在下游修建一定数量堆石堰或者丁坝, 抬高下游水位, 避免水流冲刷底部, 也为鱼类通过堰槽组合设施形成良好的条件。堰槽后薄水层区域的特征长度和特征宽度变化规律可以为连续群堰的池间距选择提供一定的参考。

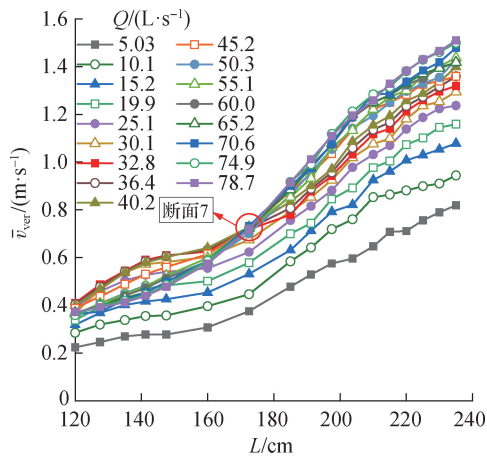


图6 不同流量下中垂线平均流速

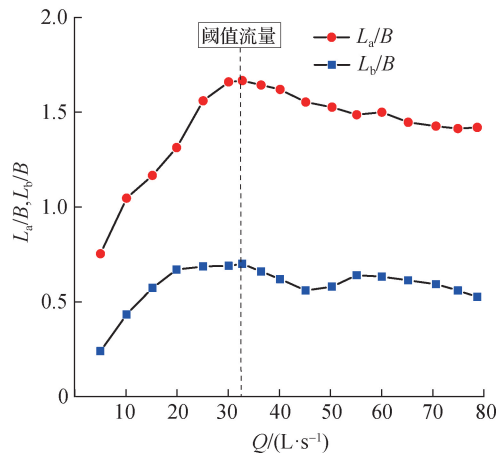


图7 不同流量下薄水层区域尺寸

Fig. 6 Average flow velocity of the vertical line at different flow rates

Fig. 7 Area size of thin water layer under different flow rates

3 流量公式探讨分析

3.1 排淤量水槽测流公式

在排淤量水槽内, 水深沿程变小, 流速变大, 在梯形断面段内由缓流变成急流, 出现临界水深。根据临界流原理得知, 临界水深与流量之间有稳定的关系, 结合能量方程可以推求出在流量阈值范围内排淤量水槽

的测流公式^[5]。

根据临界流断面的 $Fr = 1.0$ ，得到临界断面流速与临界水深的关系式：

$$v_{Cr} = \sqrt{gh_{Cr}} \quad (3)$$

式中： v_{Cr} 为临界流速，m/s； h_{Cr} 为临界水深，m。则可以得到流量的初步表达式：

$$Q = v_{Cr}A_{Cr} = \sqrt{gh_{Cr}}A_{Cr} = b_{Cr}\sqrt{gh_{Cr}}^{3/2} \quad (4)$$

式中： A_{Cr} 为临界断面面积， m^2 ； b_{Cr} 为临界水深断面宽度，m。

由图5得知，临界水深出现的位置随着流量变化而变化，很难确定其准确的位置，在量水槽上游段找到一个稳定的断面，通过能量方程与临界水深建立稳定的流量与水深的关系式。假设忽略上游测点断面到临界流断面的能量损失，可根据伯努利方程得到式(5)：

$$E = z_i + \frac{v_i^2}{2g} + h_i = z_{Cr} + \frac{v_{Cr}^2}{2g} + h_{Cr} \quad (5)$$

式中： z_i 为上游 i 断面测点底部高程，m； v_i 为上游 i 测点平均流速，m/s； h_i 为上游 i 断面测点水深，m； z_{Cr} 为临界流断面底部高程，m。

由于2个断面底部高程相同，将式(5)带入到式(4)可得：

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} b_{Cr} \sqrt{g} \left[h_i + \frac{v_i^2}{2g} \right]^{3/2} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} b_{Cr} \sqrt{g} H_i^{3/2} \quad (6)$$

式中： H_i 为上游 i 断面全水头，m。

考虑局部能量损失，引入流量系数(C_d)修正流量公式。式(6)中断面全水头包括水深及流速水头，在流量未知的情况下无法得到流速水头，所以在实际应用中多采用水深代替总水头；在山区河流或溪流中，水流常含有泥沙，若通过修建测压井去获得测点断面全水头，会造成测压井堵塞，需要人工进行维护，运行成本高，所以引入行进流速系数(C_v)，将全水头 H_i 转换成 h_i ，参考堰流流量公式^[21]，得到最终的排淤量水槽的测流公式：

$$Q = 0.385 C_d C_v b \sqrt{2g} h_i^{3/2} \quad (7)$$

3.2 堰槽组合测流公式

当流量大于阈值时，两侧克伦普堰开始过流，使原有的流量公式无法继续使用。因此，Wessels 和 Rooseboom^[1]提出将总流量看成2个部分，一部分为两侧堰顶过流流量(Q_w)，另一部分为量水槽过流流量(Q_t)。通过使用已有的克伦普堰公式计算 Q_w ，再通过总流量(Q_t)减去 Q_w 得到槽宽范围理论上的过流流量(Q_t)，如式(8)。最终，根据量水槽的流量公式，计算出大于流量阈值时，量水槽新的流量系数经验公式。

$$Q_t = Q_t - Q_w \quad (8)$$

有学者^[19]指出，已有的克伦普堰的流量系数公式仅适合于流线垂直于堰顶的二维流动状态，对于有横向流动的克伦普堰不再适用。在水槽试验中发现，当流量大于阈值时，量水槽侧壁开始过流，克伦普堰堰顶存在明显横流。因此，Wessels 和 Rooseboom^[1]提出的流量公式算法存在一定的误差。通过试验发现，堰槽组合装置在侧堰过流情况下的过流方式与迷宫堰相似，故本文把堰槽组合看作成2个L型迷宫堰的组合，将迷宫堰和克伦普堰的流量公式相结合，得到式(9)：

$$Q = 0.385 m_0 L_w \sqrt{2g} h_w^{3/2} \quad (9)$$

式中： m_0 为堰槽组合侧堰过流时的综合流量系数； L_w 为堰槽组合的有效臂长，为克伦普堰长加上量水槽侧壁的长度总和，m； h_w 为堰槽组合上游高于堰顶高程的水深，m。

3.3 流量系数

在阈值流量范围内，将 C_v 和 C_d 乘积看作成综合流量系数(C_{dv})。根据试验数据，分别对量水槽进口段5

个测点(测点 1—5)水深与计算出的综合流量系数进行拟合, 发现测点 4 与综合流量系数的相关性最强, 其复相关系数达 0.998, 故把测点 4 作为流量阈值范围内的水位测点。通过拟合得到排淤量水槽综合流量系数的经验公式表达式(式(10))。图 8 为阈值流量下, 排淤量水槽综合流量系数随测点 4 相对水深变化图。由图 8 可见, 综合流量系数随着测点相对水深增大而增大。

在流量大于阈值情况下, 选择堰槽前区域 M1 处水深作为测点水深, 距量水槽进口 120 cm 处。根据试验数据对 m_0 进行公式拟合, 其复相关系数相关达 0.999, 得到经验公式(11)。图 9 为侧堰过流时, M1 处堰槽组合流量系数随着 $h_w/(h_w + P)$ 变化的情况。由图 9 可知, 流量系数随着 $h_w/(h_w + P)$ 增大而减小, 故流量系数随着上游相对测点 h_w 增大而减小。

整体来看, 无论是在流量阈值内还是流量阈值外, 测点 4 和测点 M1 的水深都是随着流量增大而增大, 所以 C_{dv} 随着流量增大而增大, m_0 随着流量增大而减小。

$$C_{dv} = 0.4403(h_4/d)^2 + 0.0941(h_4/d) + 1.1602 \quad h_4/d \leq 0.885 \quad (10)$$

$$m_0 = 0.96317 + 0.14046 \frac{h_w}{h_w + P}^{-1.58454} \quad h_4/d > 0.885 \quad (11)$$

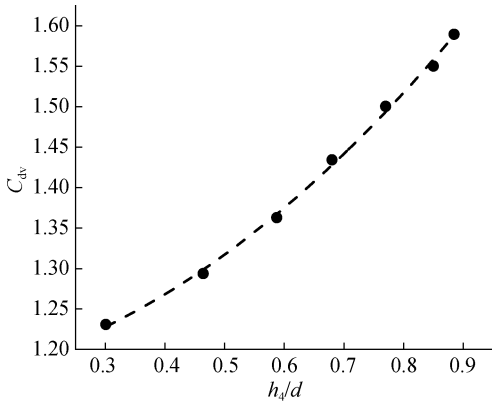


图 8 综合流量系数随相对作用水头的变化

Fig. 8 Changes in comprehensive flow coefficient

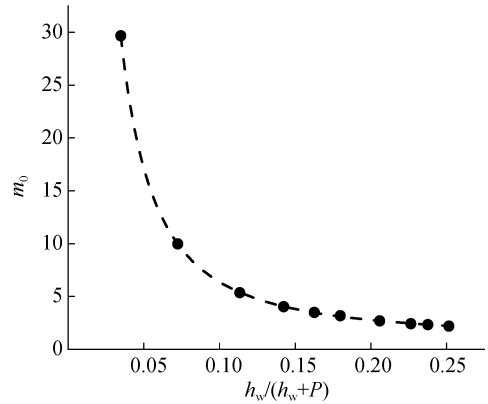


图 9 堰槽组合流量系数随相对作用水头的变化

Fig. 9 Change of flow coefficient of weir and flume combination

3.4 测点 4 与测点 M1 水深关系

在河流中修建堰槽组合设施时, 会使原有河道局部硬化、断面形状规则化, 类似人工渠道断面。为不破坏原有河道结构以及节约建设成本, 会尽可能减少河道渠道化的长度。同时, 水流中泥沙也会在堰槽组合前淤积, 导致测点 M1 水深(h_{m1})测量误差大或者无法获得相对堰顶高程的水深。结合南非河已有的堰槽组合实际工程及中国北方多泥沙水源灌区长喉道量水槽运行情况, 发现排淤量水槽内不会淤积泥沙。因此, 应将流量测量断面建立在量水槽内, 以避免槽前淤积和河道断面形状改变引起的测流精度降低。在试验模型中, 通过对槽内各断面水流稳定性观察及分析, 发现测点 4 水深与测点 M1 水深之间的关系稳定, 相关性高, 可简化测量工作步骤, 提高实际工程中测量精度。当流量大于阈值时, 只需测量测点 4 的水深, 就可以得到河道的总流量。图 10 为测点 4 与测点 M1 之间的水深关系图, 由图 10 可知, 2 个测点之间有很强的线性关系, 测点 M1 水深随着测点 4 水深增加而增加。拟合二者之间的经验公式如式(12), 其复相关系数达 0.995。

$$h_{m1}/d = 0.7903(h_4/d) + 0.3141 \quad (12)$$

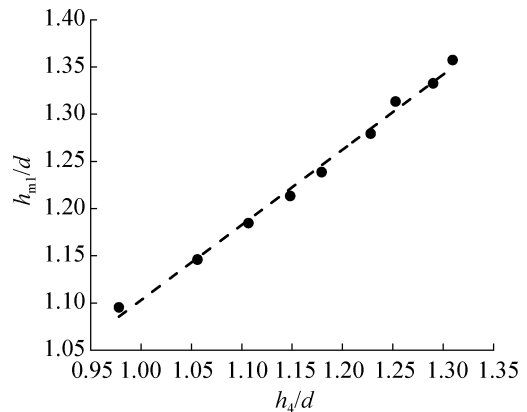


图 10 测点 4 与测点 M1 之间的水深关系

Fig. 10 Water depth relationship between measuring point 4 and measuring point M1

3.5 流量公式及测量精度验证

通过前文的公式探讨以及测点水位的选取和转换,得到阈值范围内和阈值范围外的流量公式,如式(13)和式(14)。在流量阈值以内的7种流量工况下,将测点4水深带入式(13)得到计算流量值,并与实测值对比,结果见表2。由表2得知,在流量阈值内,流量最大相对误差为0.53%,平均相对误差为0.35%。将流量阈值外10种流量条件下的测点4水深带入式(14),得到计算流量值,结果发现,最大流量相对误差为2.85%,平均相对误差为1.36%。从整体来看,所有相对误差均小于3%,满足河流量水要求,说明所得流量公式计算准确,可以有效进行推广。堰槽组合装置在实际河流或溪流修建中时,尽可能选择顺直河道修建,避免弯道水流结构的影响。同时,为避免堰槽后的河床冲刷以及提高山区河流的消能能力,堰槽组合可以配合石块堰一起修建,形成连续性的堰群。

$$Q = 0.385 C_{dv} b \sqrt{2g} h_4^{3/2} \quad h_4/d \leq 0.885 \quad (13)$$

$$C_{dv} = 0.4403 (h_4/d)^2 + 0.0941 (h_4/d) + 1.1602$$

$$Q = 0.385 m_0 L_w \sqrt{2g} (0.7903 h_4 + 0.3141 d - P)^{3/2} \quad h_4/d > 0.885 \quad (14)$$

$$m_0 = 0.96317 + 0.14046 \left[1 - \frac{P}{0.7903 h_4 + 0.3141 d} \right]^{-1.58454}$$

表 2 实测流量值与计算流量值对比结果

Table 2 Comparison results of measured flow value and calculated flow value

h_4/cm	$Q/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$		相对误差/%	h_4/cm	$Q/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$		相对误差/%
	计算值	实测值			计算值	实测值	
4.51	5.01	5.03	-0.40	15.84	45.8	45.2	1.33
6.96	10.2	10.1	0.99	16.60	51.1	50.3	1.59
8.81	15.2	15.2	0	17.22	55.9	55.1	1.45
10.20	19.8	19.9	-0.50	17.69	59.8	60.0	-0.33
11.55	25.0	25.1	-0.40	18.42	66.2	65.2	1.53
12.75	30.2	30.1	0.33	18.79	69.7	70.6	-1.27
13.27	32.8	32.8	0	19.35	75.1	74.9	0.27
13.97	37.5	36.5	2.74	19.64	78.0	78.7	-0.89
14.67	39.4	40.2	-1.99				

4 结 论

本试验将克伦普堰与排淤量水槽进行组合,在5~79 L/s流量范围内,对堰槽组合进行了自由出流条件下的物理模型试验,初步探究堰槽组合装置的水力特性以及测流机制,主要结论如下:

(1) 试验堰槽组合装置流量阈值为32.75 L/s,阈值相对水深为0.885,阈值相对水深可作为两侧堰顶过流与不过流的临界值。

(2) 在流量阈值内,量水槽槽内各测点的纵向时均流速均随着流量增大而增大。但当流量超过阈值时,量水槽槽内前段各测点纵向时均流速随着流量增大而减小;后段各测点纵向时均流速随着流量增大而增大,相交于槽内收缩扭面段中部附近。

(3) 槽内流时,堰槽下游薄水层区域的特征长度和特征宽度随着流量增加而增加;堰流时,薄水层特征长度随着流量增大而减小,而特征宽度随着流量增大而先减小后增大再减小,最大值均出现在流量阈值情况下。

(4) 槽内流时综合流量系数随着流量增大而增大;堰槽组合为堰流时流量系数随着流量增大而减小。试验流量变幅近16倍,建立的测流公式计算结果与实测值相对误差均小于3%,精度满足天然河流中流量测

量要求。

本文建立的堰槽组合装置流量公式、流量系数经验公式为模型尺寸试验数据拟合所得,对实际溪流可根据几何比尺进行流量换算,流量系数公式需进一步试验确定;本试验在较缓底坡情况下进行,还需进一步探讨不同底坡、不同体型参数以及不同淹没度下的堰槽组合装置的测流机制。

参考文献:

- [1] WESSELS P, ROOSEBOOM A. Flow-gauging structures in South African rivers: part 1: an overview[J]. *Water SA*, 2012, 35(1): 1-9.
- [2] 王兆印,张晨笛.西南山区河流河床结构及消能减灾机制[J].*水利学报*, 2019, 50(1): 124-134. (WANG Z Y, ZHANG C D. Bedforms, energy dissipation and disaster mitigation mechanism in mountain rivers of Southwest China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 124-134. (in Chinese))
- [3] 王庆国,李嘉,李克锋,等.减水河段水力生态修复措施的改善效果分析[J].*水利学报*, 2009, 40(6): 756-761. (WANG Q G, LI J, LI K F, et al. Effectiveness of hydraulic ecological rehabilitation measures in flow reduced river reaches[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(6): 756-761. (in Chinese))
- [4] 岳俊涛,甘治国,廖卫红,等.梯级开发对河流水文情势及生态系统的影响研究综述[J].*中国农村水利水电*, 2016(10): 31-34. (YUE J T, GAN Z G, LIAO W H, et al. An overview of the influence on the flow regime and river ecosystem by the hydropower cascade development[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(10): 31-34. (in Chinese))
- [5] 王长德.量水技术与设施[M].北京:中国水利水电出版社,2006. (WANG C D. *Water measurement technique and measure* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [6] 陈诚,夏云峰,黄海龙,等.大型河工模型分布式表面流场测量系统研制及应用[J].*水利水运工程学报*, 2018(1): 17-22. (CHEN C, XIA Y F, HUANG H L, et al. Development and application of measurement system for surface flow field in large-scale river model test[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(1): 17-22. (in Chinese))
- [7] 徐立中,张振,严锡君,等.非接触式明渠水流监测技术的发展现状[J].*水利信息化*, 2013(3): 37-44, 50. (XU L Z, ZHANG Z, YAN X J, et al. Advances of non-contact instruments and techniques for open-channel flow measurements[J]. *Water Resources Informatization*, 2013(3): 37-44, 50. (in Chinese))
- [8] 管大为,严以新,郑金海,等.矮堰基础冲刷研究进展[J].*水科学进展*, 2017, 28(2): 311-318. (GUAN D W, YAN Y X, ZHENG J H, et al. Research progress on scour at weir-like structures[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 311-318. (in Chinese))
- [9] PITON G, RECKING A. Effects of check dams on bed-load transport and steep-slope stream morphodynamics[J]. *Geomorphology*, 2017, 291: 94-105.
- [10] DUST D, WOHL E. Characterization of the hydraulics at natural step crests in step-pool streams via weir flow concepts[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(9): W09542.
- [11] BAKI A B M, ZHU D Z, HARWOOD A, et al. Rock-weir fishway: I: flow regimes and hydraulic characteristics[J]. *Journal of Ecohydraulics*, 2017, 2(2): 122-141.
- [12] THORNTON C I, MENEGHETTI A M, COLLINS K, et al. Stage-discharge relationships for U-, A-, and W-weirs in un-submerged flow conditions[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2011, 47(1): 169-178.
- [13] WANG L, MELVILLE B W, SHAMSELDIN A Y, et al. Impacts of bridge piers on scour at downstream river training structures: submerged weir as an example[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4): e2019WR026720.
- [14] GUAN D W, MELVILLE B W, FRIEDRICH H. Flow patterns and turbulence structures in a scour hole downstream of a submerged weir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(1): 68-76.
- [15] KUPFERSCHMIDT C, ZHU D Z. Physical modelling of pool and weir fishways with rock weirs [J]. *River Research and Applications*, 2017, 33(7): 1130-1142.
- [16] KERR J R, KARAGEORGOPOULOS P, KEMP P S. Efficacy of a side-mounted vertically oriented bristle pass for improving upstream passage of European eel (*Anguilla Anguilla*) and river lamprey (*Lampetra fluviatilis*) at an experimental Crump weir[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 121-131.
- [17] 王文娥,薛城,胡笑涛.沟灌三角形长喉道田间量水槽水力特性试验及数值模拟[J].*农业工程学报*, 2019, 35(3): 109-116. (WANG W E, XUE C, HU X T. Numerical simulation and test of hydraulic performance for triangle long-throat flume

- for water measurement in furrow irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 109-116. (in Chinese))
- [18] 冉聘颀, 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 D J, WANG W E, HU X T, et al. Analyzing hydraulic performance of trapezoidal cutthroat flumes[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 236-244. (in Chinese))
- [19] ZUIKOV A L. Hydraulics of the classical crump weir water gauge[J]. Power Technology and Engineering, 2017, 50(6): 611-619.
- [20] MARTÍN-VIDE J P, ANDREATTA A. Channel degradation and slope adjustment in steep streams controlled through bed sills[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(1): 38-47.
- [21] 李玉柱, 江春波. 工程流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. (LI Y Z, JIANG C B. Engineering fluid mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese))

Experimental study on the flow measurement mechanism of a weir-flume combination facility*

WANG Wene, LIAO Wei, CHEN Tucheng, WANG Hui, HU Mingyu, HU Xiaotao

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,
Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The significant variation of seasonal streamflow in mountainous regions prevents the existing irrigation channel of the water volume facilities from meeting the flow measurement accuracy requirements in an extensive flow range. In this paper, a combined water measuring facility based on crump weir and sluicing flume is proposed, and the mechanism of its flow measurement is explored in an extensive flow range. Based on the hydraulic performance test of the generalized flume in the range of 5—79 L/s, the changes of the water surface line, Froude number (Fr), vertical longitudinal average velocity, and the characteristic length and width of a thin water layer were analyzed under different flow rates. Furthermore, the flow measurement equations were formulated in different flow threshold ranges. The results show that: ① As the flow rate increases, the flow pattern of the combined facility changes from being an in-groove flow to a weir flow, and the relative water depth of the threshold value corresponding to the flow rate is 0.885. The flow measurement formulas of the in-groove flow and the weir flow are obtained through a fit. The relative error is less than 3% compared with the measured flow rate. ② The in-groove and the weir flow have different characteristics in the combined facility; when the in-groove flow occurs, the average longitudinal velocity, the characteristic length and width of the thin water layer, and the comprehensive flow coefficient of each measuring point increases with the flow rate. When the weir flow occurs, the average longitudinal velocity of each measuring point in the front of the flume decreases as the flow rate increases. In contrast, the average longitudinal velocity of each measuring point in the back increases with the flow rate. The average section velocity near the middle of the contraction torsion surface in the flume is the same. ③ The combined facility flow coefficient m_0 decreases as the discharge increases. ④ The characteristic length and width of the thin water layer downstream decrease as the flow rate increases, and the maximum value is reached at the flow threshold. This study effectively solves the lack of flow measuring facilities in open channels with a significant flow fluctuation. It can provide a reference in the application of flow measuring facilities for seasonal streams in mountainous regions.

Key words: weir-flume combination; flow measurement; mountain rivers; flow threshold; threshold of water level

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52079113) and the Shaanxi Water Resources Science and Technology Program of China(No. 2021slkj-8).