文章编号：1672 - 3317（2021）01 - 0138 - 06

底坡对 U 形渠道量水平板测流影响分析

廖 伟，张维乐，王文娥*，胡笑涛
（西北农林科技大学 旱区农业工程教育部重点实验室，陕西 杨凌 712100）

摘 要：【目的】量水平板具有构造简单、不易淤积等优点，虽已建立流量与平板偏转角、上下游水深及板型等因素的关系式，但底坡对量水平板水力特性的影响还缺乏系统研究，有必要深入分析，以提高量水平板测流公式的适用范围。【方法】以北方灌区常见 U 形渠道为试验水槽，选择断面最佳收缩比 0.439 的 U 形渠道量水平板为试验对象。通过设置 3 种水槽底坡（0.000 2~0.001）和 4~7 种流量（10~44 L/s）共 18 种试验工况，分析了各工况下水面线和平板偏转角的变化规律，研究了底坡对水面线、相对水头损失、能量转化系数、平板偏转角度和综合流量系数的影响。基于闸孔淹没出流公式，拟合出含底坡变量 i 的半经验流量公式。【结果】在相同流量情况下，板后水跃长度、能量转化系数以及综合流量系数随底坡增大而增大；水面线、相对水头损失和平板偏转角度均随底坡增大而减小；在试验流量范围内，拟合流量公式的平均相对误差为 2.6%，最大相对误差为 6.5%，满足灌区量水要求。【结论】底坡对 U 形渠道量水平板测流影响显著，建立了包含渠道底坡的 U 形量水平板测流公式，提高了其适用性。

关 键 词：U 形渠道；量水平板；流量公式；底坡
中图分类号：S274.4 **文献标志码**：A doi：10.13522/j.cnki.ggps.2020292 OSID：

廖伟，张维乐，王文娥，等. 底坡对 U 形渠道量水平板测流影响分析[J]. **灌溉排水学报**, 2021, 40(1): 138-143.
LIAO Wei, ZHANG Weile, WANG Wen'e, et al. Impact of Bed Slope on Accuracy of the Horizontal Plate for Measuring Water Flow in U-Shaped Channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 138-143.

0 引 言

【研究意义】灌区量水技术是实现灌区水资源优化配置和现代化农业用水管理的基本手段，槽类特设量水设施在我国灌区应用较广，但实际测流时易造成上游壅水，增大水头损失，导致泥沙淤积等问题[1-3]。我国北方灌区地势平缓，灌溉水流泥沙量高，研发不宜淤堵、测流精度高的新型量水设施，对提高灌区现代化管理水平具有重要的应用价值[4-5]。可绕轴转动的悬垂测流平板是一种新型量水设施，具有平板偏转角与流量关系稳定、测流时泥沙易通过、不淤积、构造简单等特点，适用于地势平缓、水流泥沙量大的渠道流量测量。

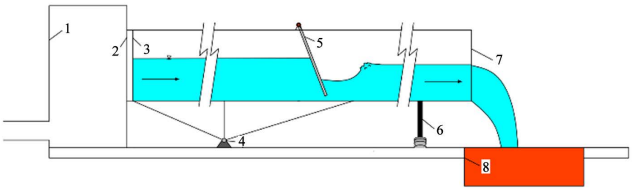
平板量水设施受体型、密度、渠道类型因素影响，应用广泛的流量计算模型较少。闸门属于板状结构，确定出流条件对流量的准确计算有着重要意义，板后水流流态与闸孔出流淹没状态水流流态相似，因此了解闸孔出流水力计算模型对平板量水设施流量模型选取十分关键[6-9]。

【研究进展】郭永鑫等[10]通过对传统流量计算模型的对比，建立基于流态辨识的弧形闸门出流计算模型，提出根据不同流态选取不同流量系数，为过闸流量计算提供新思路的同时也对平板量水设施流量计算模型选取有所启示。对于平板量水设施流量计算模型，国内外多通过量纲分析原则[11-12]进行经验公式推导，虽然精度较高，但公式影响因素较多，缺乏对水流流态参数的考虑。Litrico 等[13]通过闸堰结合的方式，设计适用于灌区的自动闸门。Vatankhah 等[14]设计可定轴转动的半圆状闸门结构，基于量纲分析，在自由出流条件下给出 2 种流量计算模型，所得公式形式简单，精度较高。王文娥等[15-16]设计了不同形式的量水平板，提出闸孔出流流量计算模型，并得到了关于流量系数与相对开度的计算公式，但并没有考虑底坡对流量系数的影响。【切入点】目前国内外关于旋转平板测流研究较少，且以往大部分研究都基于同一坡度下，探究流量和偏转角之间的关系，并未考虑坡度对于二者关系的影响。【拟解决的关键问题】因此，基于底坡对测流的影响，在上述研究基础上进一步对闸孔出流流量计算模型完善。提高量水平板测流公式的适用性，以期对平板量水设施的实际应用提供理论指导。

收稿日期：2020-06-04
基金项目：公益性行业（农业）科研专项（201503125）；“十三五”国家重点研发计划（2016YFC0400203）
作者简介：廖伟（1994-），男。硕士研究生，主要从事工程水力学研究。E-mail: 875517412@qq.com
通信作者：王文娥（1975-），女。教授，主要从事节水灌溉技术、流体机械及排灌设备等研究。E-mail: wangwene@nwsuaf.edu.cn

1 试验设计

试验在西北农林科技大学北校区水工水力学与泥沙试验室进行。试验渠道为 U 形有机玻璃渠道，全长 12 m，渠道横断面高 40 cm，弧形底部直径 40 cm，中心角 152°，壁面综合糙率 0.011。渠道底部安装有铰接支柱和升降支柱，可以进行底坡调整。试验系统包括：潜水泵、电磁流量计、调节阀门、稳水池、U 形渠道、U 形测流板装置、尾水调节闸门等，其中试验用水为系统循环水。U 形测流板由铝材料制作而成，平板厚 8 mm，长 44 cm，底弧直径为 20 cm，安装至进口断面 5 m 处，图 1 为试验水槽示意。



注 1-进水池；2-花墙；3-柔性连接；4-铰接支柱；5-测流悬垂平板；6-升降支柱；7-尾门及出水口；8-地下回水渠道

图 1 试验水槽示意

Fig.1 Schematic diagram of the test tank

根据实际渠道流态，设置 10 个水位测量点，具体位置见表 1。通过 SCM60 水位测针对水位进行测量，精度为 0.1 mm。平板偏转角用数显水平角度尺测量，分辨率为 0.1°，公差为±0.1°。同一流量下，每个位置水位及偏转角度均进行 3 次测量，并取平均值。

表 1 水位测量点位置

Table 1 Position of water level measuring point

测点编号	距 U 形渠道进口的距离/cm
1	300
2	450
3	紧贴板后
4	580
5	640
6	680
7	740
8	800
9	900
10	1000

注 测流平板位置距离 U 形渠道进口 500 cm 处。

试验设置 0.000 2、0.000 5、0.001 共 3 种坡降，流量选取 11.86、14.39、20.25、25.53、30.42、33.8 L/s，共 18 种试验工况。在每种工况下测量水位以及平板偏转角。在前序试验中，分别对收缩比 0.715、0.547、0.439 和 0.337 的量水平板进行试验，发现板型收缩比是影响 U 形平板测量的重要因素[15]，当板型收缩比为 0.439 时，该型号的量水平板不仅相对水头损失小，而且偏转角度稳定，测流精度高。故本文选择收缩比 0.439 的 U 形量水平板为试验对象。

目前关于平板量水设施的流量计算模型主要分为 2 种：一种通过平板的力矩平衡和动量方程分析，得到流量、水深、角度三者的理论关系式。另一种根据判断平板板后流态，并借鉴闸孔淹没出流公式，得到半理论半经验公式。其中闸孔淹没出流公式中没有出现板后水深，便于生产实际应用。因此，本文基于闸孔淹没出流公式，对 U 形量水平板进行分析，其流量公式可表示为：

$$Q=\mu_s be\sqrt{2gh_1}\ , \qquad (1)$$

式中：Q 为水槽总流量（m^3/s）；b 为测量平板宽度（m）；e 为平板开度；h_1 为板前水深（m）；μ_s 为综合流量系数。

2 结果与分析

2.1 水面线

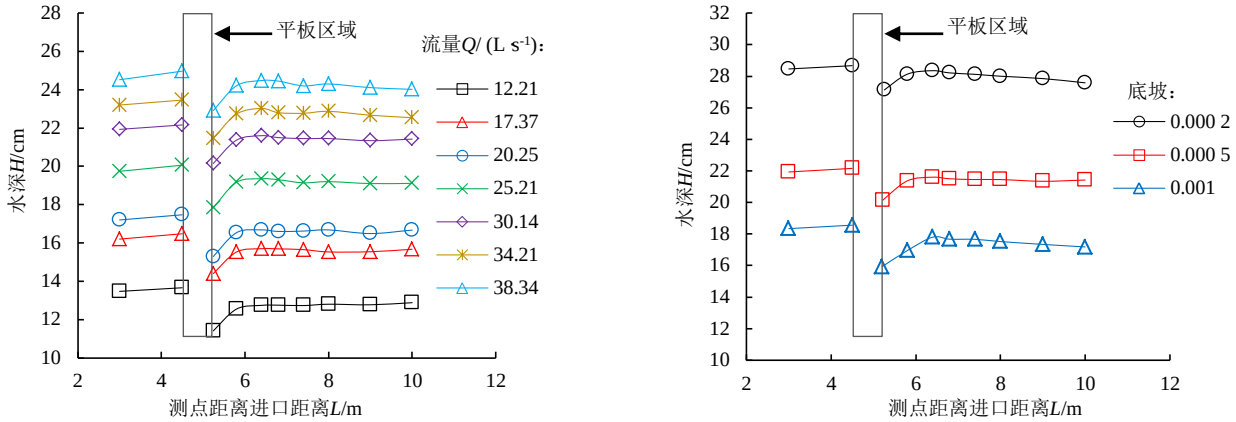
通过对不同底坡下悬垂平板附近区域的 10 个断面水深进行测量，得到了不同工况下的沿程水深，如图 2 所示。图 2（a）为不同流量下，底坡 0.000 5 时的水深沿程变化，可以看出不同流量下的水深变化规律基本趋于一致，呈现板前水深逐渐升高，板后水深急剧下降，再急剧上升，最后再缓慢下降。这是由于水流受到悬垂平板的阻挡，在板前形成小幅度的壅水现象，随着水体在悬垂板底部和两侧发生绕流后，产生淹没式水跃，水面开始抬高。同时由于受到尾门跌水的影响，水面开始缓慢下降。图 2（b）为不同底坡下，流量 30 L/s 时的水深变化，可以看出渠道底坡对水面线影响特别大，随底坡增大，水面线将整体下降。这说明渠道底坡越大，水流动能占水体的总能量比越大，水体通过悬垂板的效率越高。从板后局部水深沿程变化发现，渠道底坡越大，板后的水跃长度越大。这是因为在较陡的底坡下，水体需要更长的恢复区，发生速度重组，重新获得稳定水位。

2.2 水头损失及能量转化系数

明渠水头损失主要分为局部水头损失和沿程水头损失。由于水流在悬垂平板阻挡作用下，形成很明显的紊流，因此明渠紊流的总水头损失主要来源于：主流黏性耗散、二次流黏性耗散以及维持紊动 3 部分。同时由于本研究的悬垂量水板所在区域较短，所以水头损失主要来源局部水头损失，其相对水头损失公式如下：

$$\frac{h_w}{H}=\left[\left(z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{\alpha_1 v_1}{2g}\right)-\left(z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{\alpha_2 v_1}{2g}\right)\right]/H\ , \qquad (2)$$

式中：h_w/H 为相对水头损失；z_1、z_2 为位置水头；p_1/γ 为压强水头；$\alpha_1 v_1/2g$、$\alpha_2 v_2/2g$ 为速度水头；p_1、p_2 为水面压强；γ 为水的体积质量；α_1、α_2 动能修正系数；g 为重力加速度；v_1、v_2 为断面平均速度。



（a）不同流量（底坡 0.000 5）　　(b) 不同底坡（流量 30 L/s）

图 2 不同条件下的 U 形渠道量水平板上下游水深

Fig.2 The water depth of the U-shaped channel under different conditions

图 3 为不同底坡下，流量与相对水头损失的关系。整体分析来看，在流量 10~45 L/s 和底坡 0.000 2~0.001 范围内，相对水头损失均在 10%以内，满足我国北方灌区量水水头损失要求。同时可以发现，随着流量增大，相对水头损失逐渐减小，二者呈负相关关系。对于不同底坡下相对水头损失变化，底坡在 0.000 2~0.000 5 范围内，相对水头损失变化不大，而底坡在 0.000 5~0.001 范围内，相对水头损失随着底坡增大而增大，二者呈正相关关系。这是因为在同一流量下，底坡越陡，渠道水深越浅，速度水头越大，在局部水头损失系数不变情况下，断面平均速度越大，水头损失就越大。为了更加说明能量之间的转化，将悬垂平板二侧水流平均动能差与测板前水流单位势能之比定义为能量转系数 k。图 4 为不同底坡下，流量 Q 与能量转换系数 k 之间的关系，其能量转换系数 k 随着流量增加而减小，但随着底坡增加而增加。这说明当流量增大时，悬垂平板受到更大水压力，为了保持力矩平衡，平板偏转角增大，导致平板开度增大，促进更多的水体从二侧和底部通过，使上下游水位差减小。最终导致在能量转化上，势能向动能的转化率减少。从能量消耗方面分析，水流在通过平板时，在平板后部产生大量的旋涡，形成尾流区。已有研究表明，在雷诺数较大区域，随着水体离开平板距离增加，维持紊动部分的能量损失密度也将迅速增加，最终促进水流的能量损失[17]。

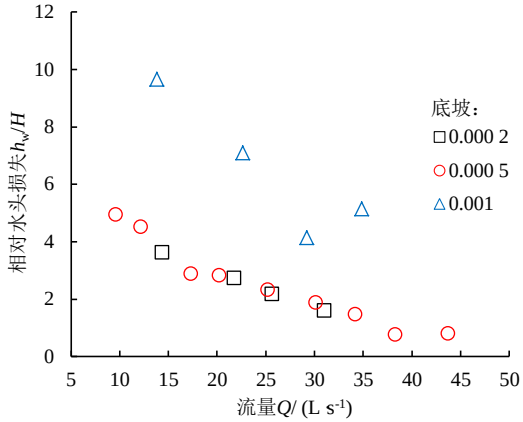


图 3 不同底坡下 h_w/H 与 Q 的关系

Fig.3 Relationship between h_w/H and Q under different bottom slopes

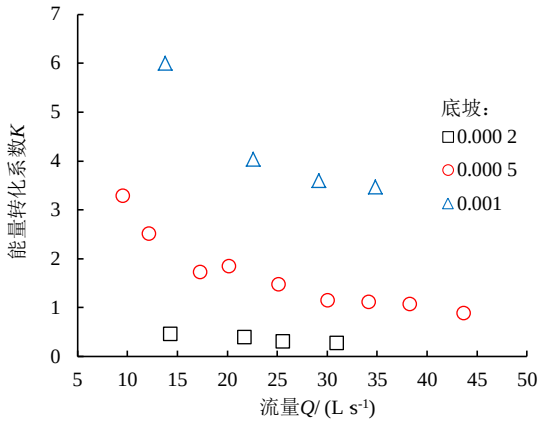


图 4 不同底坡下 K 与 Q 的关系

Fig.4 Relationship between K and Q under different bottom slopes

2.3 平板偏转角度

图 5 为不同底坡下，偏转角与流量的关系。从图 5 可知，在其他条件不变情况下，平板偏转角 α 与流量 Q 呈现线性关系，平板偏转角 α 随着流量 Q 增加而增加。通过对比不同底坡情况下流量 Q 与偏转角 α 的关系变化，发现在底坡 0.000 2~0.000 5 范围内，底坡变化对偏转角度 α 变化影响不大，但在底坡 0.000 5~0.001 范围内，底坡变化对偏转角度 α 变化有着明显的影响。随着底坡增大，流量 Q 与偏转角度 α 拟合直线的斜率 b 减小。这表明明渠底坡越陡，偏转角 α 对于流量 Q 变化的敏感性就越小。明渠的正常水深会受坡度影响，在渠道糙率及流量不变的情况下，坡度越小，正常水深越大。板前水压力大小与板前水深有关，底坡的增大使板前水深

减小，进而平板对于中心轴的偏转力距减小，最终导致在相同流量下，底坡越大，平板偏转角就越小。

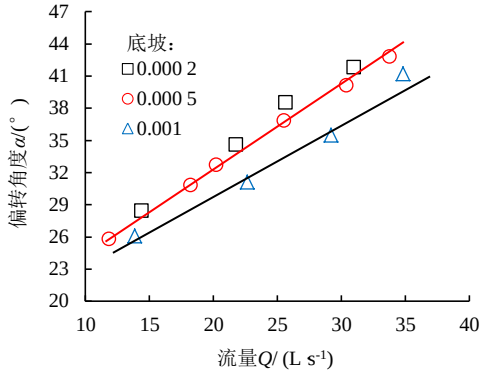


图 5 不同底坡下 α 与 Q 的关系

Fig.5 The relationship between α and Q under different bottom slopes

2.4 综合流量系数

探究影响综合流量系数 μ_s 的因素，是修建量水建筑的关键步骤。在闸孔出流模型中，不同的出流流态，决定了流量系数的影响因素也不同。因此，通过借鉴闸孔出流流态判断标准，发现悬垂平板测流的综合能耗系数 $Er>1$，傅汝德数 $Fr<1.5$，满足低 Fr 的完全淹没孔流的标准。已有研究表明：在低 Fr 的完全淹没孔流下，淹没孔口出流系数 μ 与闸门相对开度 e/H 和相对水头损失 η 有关[10]。由于悬垂平板不同于固定闸门，随着流量变化，平板偏转角度也发生变化，导致平板边界阻力引起的局部水头损失发生改变，所以相对水头损失 η 是一个变化值。结合悬垂平板自身的特点，在闸孔淹没出流流量系数 μ 的基础上考虑底坡变化的影响，绘制了不同水槽底坡下综合流量系数 μ_s 与平板相对开度 e/h_1 的关系图。如图 6 所示，在坡度不变条件下，综合流量系数 μ_s 随着平板相对开度 e/H 增大而减小的线性关系。同时对比相同相对开度 e/H 下，底坡 i 越大，综合流量系数 μ_s 就越大。从上面关系探讨中，发现悬垂平板的综合流量系数 μ_s 与相对开度 e/H 和底坡 i 值有关。其计算模型可以假定为：

$$\mu_s=\mathrm{f}\left(\frac{e}{h_1},i\right)=a_1\left(\frac{e}{h_1}\right)^{a_2}(i)^{a_3}, \qquad (3)$$

式中：a_1、a_2、a_3 为待定系数。

根据不同底坡下水槽试验数据，对综合流量系数模型中待定系数进行最小二乘估计，计算式为：

$$\mu_s=4.487\,5\cdot\left(\frac{e}{h_1}\right)^{-0.5}\cdot i^{0.3}=4.487\,5\cdot\left(\frac{L-L\cos\alpha}{h_1}\right)^{-0.5}\cdot i^{0.3}, \qquad (4)$$

式中：L 为悬垂平板板长。

最终将综合流量系数 μ_s 代入流量式（1）中，得到悬垂平板的半经验流量公式：

$$Q=0.487\,5\cdot i^{0.3}\cdot b\cdot h_1\cdot\sqrt{2gh(1-\cos\alpha)}\ 。 \qquad (5)$$

对拟合半经验流量公式计算出来的理论值 Q_L 与实际流量 Q_S 进行对比分析，并绘制理论值 Q_L 与实际流量 Q_S 关系，如图 7 所示。由图 7 可知，二者之间呈很好的线性关系，最大相对误差为 6.5%，平均相对误差为 2.6%，满足我国北方灌区量水误差小于 10%要求。

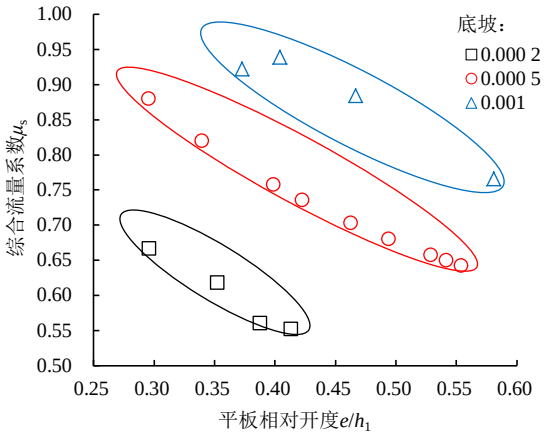


图 6 不同底坡下 μ_s 与 e/h_1 关系

Fig.6 Relationship between μ_s and e/h_1 under different bottom slopes

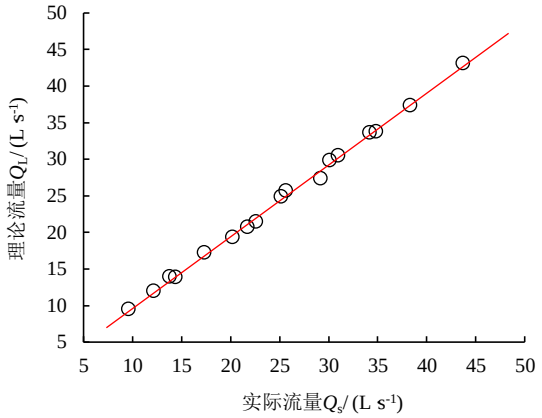


图 7 理论流量与实际流量对比

Fig.7 Comparison of theoretical discharge and actual discharge

3 讨 论

3.1 量水平板流量模型适用性探讨

底坡是影响量水建筑物水流结构的重要因素之一。水流流态变化会在一定程度上影响量水设施的测流精度[18]。相比周义仁等[19]试验结果，前人只讨论了底坡对摆杆式测流仪测流流量与摆杆角度关系影响，发现底坡影响较小，并未直接把底坡引入流量公式。而 Vatankhah 等[14]针对自由出流条件建立 2 种流量模型，但是并未考虑底坡影响，对淹没出流流态下的流量模型参数进行率定。本试验中发现量水平板测流精度受水流流态影响显著，在收缩比 0.439U 形量水板情况下，底坡改变对于综合流量系数 μ_s 与相对开度 e/h_1 的关系影响较大，故直接将底坡值引入测流公式中。同时，本文在王文娥等[16]试验基础上，进一步讨论了底坡对于 U 形渠道量水平

板测流影响，完善了 U 形量水平板测流公式，提高了其适用性。

3.2 量水平板流量模型不足

本试验在清水条件下进行，仅探讨了底坡这一因素对于量水平板测流的影响并得出了相应的测流公式。所得流量计算模型对于不同尺寸的 U 形渠道适用性需进一步验证。在北方灌区中，明渠水流中常携带大量泥沙，并且伴有石块或其他杂物落入水中造成下游不同程度的壅水和流速分布紊乱。因此，还需要进一步考虑水流泥沙量、下游壅水程度和板前流速分布等因素对于综合流量系数的影响。

4 结 论

1）渠道底坡对其测量平板板前板后水深以及板后水跃长度影响较大。随着渠道底坡增大，水面线整体降低，板后水跃长度增大。

2）同一流量下，在较小底坡（i<0.000 5）范围内，底坡改变对相对水头损失影响较小；而在较大底坡（i>0.000 5）范围内，相对水头损失随着底坡增大而减小。在能量转化方面，能量转化系数 k 随着底坡增大而增大。U 形量水平板在不同底坡下的水头损失均小于 10%，满足灌区量水要求。

3）同一流量下，由于底坡影响渠道水深进而决定板前水压力大小，导致平板偏转角随着坡度增大而减小。

4）在闸孔流量模型基础上，发现 U 形量水平板的综合流量系数 μ_s 与相对开度 e/H 和底坡 i 值有关，拟合出含底坡变量 i 的半经验流量公式，提高了 U 形量水平板的实用性，其平均相对误差为 2.6%，最大相对误差为 6.5%。

5）在实际应用时，应在上游设置拦污栅拦截漂浮物；加设防风罩等保护装置，降低风荷载等气候因素对偏转角度的影响，提高 U 形渠道量水平板测流精度。

参考文献：

[1] 冉聃颉, 王文娥, 胡笑涛. 梯形喉口无喉道量水槽设计及其水力性能模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 177-183.
RAN Yanjie, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Design of trapezoidal cut-throated flume and its hydraulic performance simulation and test [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (15): 177-183.

[2] 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.

[3] 王玉宝, 杨娟, 李鑫, 等. U 形渠道便携式板柱结合型量水槽水力性能研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 322-330.
WANG Yubao, YANG Juan, LI Xin, et al. Hydraulic performance of plate-column portable flume in U-shaped channel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 322-330.

[4] 刘鸿涛, 于明舟, 牛炎, 等. 梯形渠道翼柱型量水槽试验研究与数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 101-107.
LIU Hongtao, YU Mingzhou, NIU Yan, et al. Experimental study and numerical simulation of wing pillar-shaped measuring flume in trapezoidal channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38 (9): 101-107.

[5] 王莹莹, 王文娥, 胡笑涛, 等. 矩形薄壁侧堰水力特性试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 70-74.
WANG Yingying, WANG Wen'e, HU Xiaotao, et al. Hydraulic characteristics of rectangular sharp-crested side weirs[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36 (10): 70-74.

[6] BIJANKHAN M, FERRO V, KOUCHAKZADEH S. New stage–discharge relationships for free and submerged sluice gates[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2012, 28: 50-56.

[7] 杨磊, 彭涛, 郑路, 等. 翻板闸流量系数变化特性试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(3): 54-59.
YANG Lei, PENG Tao, ZHENG Lu, et al. Experimental study on characteristics of discharge coefficient of hydraulic flap gate[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(3): 54-59.

[8] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 弧形闸门流量计算方法的比较与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(5): 20-22.
MU Xiangpeng, CHEN Wenxue, CUI Wei, et al. Comparison and analysis of discharge calculation methods of radial gates[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(5): 20-22.

[9] 曹玉升, 畅建霞, 陈晓楠, 等. 基于遗传程序的南水北调中线节制闸过闸流量计算模型研究[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 834-840.
CAO Yusheng, CHANG Jianxia, CHEN Xiaonan, et al. Research of discharge calculation model based on genetic programming applied to South-to North water diversion middle route project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 834-840.

[10] 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.

[11] 郭志华. D50U 型渠道板柱复合式流量量测装置测流性能及水力特性试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
GUO Zhihua. The experimental study on flow measurement performance and hydraulic characteristics of D50U type channel plate column combined flow measurement device[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.

[12] 石先德. 摆杆参数对摆杆式明渠测流装置测流精度影响的仿真模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
SHI Xiande. Simulation of the influence of swing rod parameters on

the accuracy of swing rod open channel flow measuring device[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

[13] LITRICO X, BELAUD G, FROMION V. Stability analysis of automatic water level control gates in open-channels[C]//2007 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans: IEEE, 2007: 1 591-1 596.

[14] VATANKHAH A R, GHADERINIA H. Semi-circular flap gate as a flow metering structure in circular channels[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 64: 28-38.

[15] 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.

[16] 王文娥, 张维乐, 胡笑涛, 等. 基于悬垂平板偏转角的明渠流量估算模型及验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 168-175.
WANG Wen'e, ZHANG Weile, HU Xiaotao, et al. Flow estimation model and verification based on deflection angle of dangling plate in open channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(19): 168-175.

[17] 赵潜宜, 刘士和, 廖伟坚. 明渠恒定紊流的总流控制方程与能量损失特性[J]. 水科学进展, 2020, 31(2) : 270-277.
ZHAO Qianyi, LIU Shihe, LIAO Weijian. Study of total flow control equations and energy loss characteristics of steady turbulent flow in open channel [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 270-277.

[18] 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.

[19] 周义仁, 石先德. 不同坡度下摆杆式测流仪量水特性的研究[J]. 节水灌溉, 2019(6): 92-94.
ZHOU Yiren, SHI Xiande. Research on water measurement characteristics of pendulum-rod flowmeter with different slope[J]. Water Saving Irrigation, 2019(6): 92-94

Impact of Bed Slope on Accuracy of the Horizontal Plate for Measuring Water Flow in U-Shaped Channels

LIAO Wei, ZHANG Weile, WANG Wen'e*, 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:【Background】Most irrigation districts in northern China are flatten and water in their channels is muddy. Existing facilities for measuring water flow in channels could cause backward water flow in their upstream and are prone to sediment deposition. Horizontal plate is a new and simply structured facility to measure water flow and can alleviate sediment deposition. While the impact of the discharge and other factors such as plate deflection angle, water depth in both upstream and downstream, and plate profile on performance of the plate method has been well documented, how bed slope of a channel affects hydraulic characteristics of the plate remains poorly understood. 【Objective】The purpose of this paper is to plug this knowledge gap, systematically investigating the effects of bed slope on reliability and accuracy of the horizontal plate for measuring water flow.【Method】U-shaped channel commonly used in irrigation areas in northern China was taken to test the method, and the volume of the horizontal plate with optimal contraction ratio of cross-section (0.439) was selected as the test object. With a total of 18 combinations, which included three bed slope ranging from 0.000 2 to 0.001 with each associated with 4~7 flow rates ranging from 10 to 44 L/s, variation of the water-surface line and the plate deflection angles in each combination were measured, from which we analyzed the impact of the bed slope on water-surface line, relative water head loss, energy conversion coefficient, plate deflection angle and comprehensive flow coefficient. Using the formula of sluice flooding discharge, a semi-empirical flow formula with the bed slope as independent variable was used to fit the data.【Result】Under the same water flow rate, the hydraulic jump length behind the plate, the energy conversion coefficient and the comprehensive flow coefficient all increased as the bed slope became steeper; in contrast, the water-surface line, the relative water head loss and the plate deflection angle all decreased as the bed slope increased. For all tested flow rates, the average relative error of the fitting formula for water flow rate was 2.6%, with a maximum of 6.5%, meeting the requirement for water flow in irrigated areas.【Conclusion】The bed slope of channel has a significant influence on accuracy of the horizontal plate for measuring water flow in U-shaped channels, and a formula considering the bed slope was proposed to calculate water flow in U-shaped channels.

Key words: U-shaped channel; volume level plate; flow formula; bed slope

责任编辑：韩 洋