

# 仿机翼形便携式量水槽水力特性试验与数值模拟

贺梦杨<sup>1</sup>, 尚海鑫<sup>1</sup>, 张宽地<sup>1,2\*</sup>, 凌 鹏<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

**摘 要:** 田间量水是实现灌区计划用水和节水农业的关键技术, 末级小截面灌区的精准测流则更为关键。该研究在机翼形量水槽的基础上, 提出结构更为简单的仿机翼形量水设备。水工模型试验于西北农林科技大学水工与水力学实验室进行, 试验渠道为 17 m×70 cm×100 cm 的矩形断面有机玻璃渠道, 量水槽模型均采用空心木制材料制作。试验设计 1 组翼长、6 组收缩比、7 组流量, 共 42 种试验方案。在水工模型试验的基础上, 采用 FLOW-3D 软件补充了多组模型进行数值模拟, 验证模拟准确性后, 对其水力性能进行分析: 上游佛汝德数小于 0.5, 喉口位置产生临界流, 下游重新恢复缓流状态; 壅水高度均值 3.25 cm, 最大值 6.32 cm, 最小值 0.46 cm; 水工模型试验与数值模拟共获得 84 组数据, 依据机翼形量水槽的测流公式推导, 得到仿机翼形便携式量水槽的测流公式, 其平均相对误差为 6.34%。仿机翼形便携式量水槽建议选择收缩比 0.606~0.709、翼长 65~80 cm。研究表明简化并没有改变机翼形量水槽原有的优点, 可以保证测流渠道的安全性。该研究可改进量水方法, 提高用水效率, 对于促进中国灌区小截面便携式量水槽的推广具有实用价值。

**关键词:** 流量测量; 数值模拟; 便携式设备; 仿机翼形; 矩形渠道

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.014

中图分类号: S274.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0117-08

贺梦杨, 尚海鑫, 张宽地, 等. 仿机翼形便携式量水槽水力特性试验与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 117-124. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.014 http://www.tcsae.org

He Mengyang, Shang Haixin, Zhang Kuandi, et al. Hydraulic performance experiments and numerical simulation of portable water measuring flume of imitating airfoil shape[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 117-124. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.014 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

灌区量水技术是实行计划用水的关键技术措施, 对于现有量水设施来说, 量水槽是灌区量水中较易使用、较易推广的一种明渠量水设施<sup>[1]</sup>。对量水槽的研究, 文丘里于 18 世纪首先观测到水流通过局部收缩的管道时水流流速会增大, 压强会降低, 且研究了流量与压差的关系, 提出了著名的文丘里流量计。Cone<sup>[2]</sup>首次提出文丘里量水槽, 基于临界流的原理, 通过测量水流流经不同几何形状收缩断面并产生临界流时的水深来计算流量。Parshall<sup>[3]</sup>改进文丘里槽, 将其命名为巴歇尔量水槽, 给出了含有水深的流量计算公式。Skogerboe 等<sup>[4]</sup>进一步研究了巴歇尔量水槽在不同工况下的水力特性。巴歇尔量水槽在淹没度大于 0.95 的工况下, 测流精度会有明显的降低<sup>[5-7]</sup>, 而且在实际工程应用中会有造价高等不利因素<sup>[8-9]</sup>出现。

从经济实用等角度考虑, 传统的侧壁收缩式量水槽在小截面渠道中应用受限, Hager<sup>[10]</sup>在常用的 3 种渠道形

式中, 首次提出了便携式装置的概念, 渠道中心放置易于调节位置的圆柱体替代侧壁收缩的形式, 以收缩渠道宽度。Hager<sup>[11]</sup>重新考虑了圆柱体放置在渠道中的情况, 并提出了采用上游能量值的测流方法。Samani 等<sup>[12-13]</sup>研究表明, 利用收缩断面来获得临界流水深是最简单的测流方法, 这一方法可以形成短喉道的量水槽而且不再需要过长的入流和出流段, 得到了误差为 5% 的测流公式。Badar<sup>[14]</sup>利用 Samani 等<sup>[13]</sup>的数据, 改进试验方法后将测流误差降低到了 4.7%。

随着计算流体力学在量水槽研究中的广泛应用, Wright 等<sup>[15]</sup>首次利用数值模拟的方法分析了巴歇尔量水槽中不同流体性质对水深流量关系式的影响。肖苡楠<sup>[16]</sup>基于 FLOW-3D 进行了田间便携式短喉槽的研究, 总结其在末级渠道测流适用性。Kolavani 等<sup>[17-18]</sup>研究了中央折流板水槽不同几何参数的影响, 并提出了一种显式的阶段-流量关系。Hager<sup>[19]</sup>研究了临界流条件下圆锥浸入矩形渠道的过流情况, Kapoor 等<sup>[20]</sup>在此基础上, 在矩形水槽中提出了圆锥形便携式水槽测流装置, 可作为小型矩形明渠临时测流装置。Samani<sup>[21]</sup>提出 3 种标准渠道下的便携式量水槽, 无论水槽或过流尺寸如何, 都可以使用已校准的方程式进行测流, 并且通过试验进行了验证。Ghare 等<sup>[22-23]</sup>提出具有可移动, 易安装等优点的圆柱形量水槽, 提出了最大测流误差为 5% 的测流公式, 可以作为临时测

收稿日期: 2020-12-28 修订日期: 2021-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51579214, 41877076)

作者简介: 贺梦杨, 研究方向为水工水力学。

Email: hemengyang@nwfau.edu.cn

\*通信作者: 张宽地, 博士, 教授, 研究方向为水工水力学及坡面水流。

Email: zhangkuandi428@126.com

流的移动装置。

现有的由文丘里流量计原理设计所得的明渠测流装置, 安装维护都需要相当高的费用, 且为固定装置, 通常需要预制水槽。传统的固定式量水槽是为了准确测量大断面渠道(干渠或主要支渠)流量, 目前对于这类渠道的流量测量比较精准<sup>[24]</sup>, 但是对于小截面的渠道(散户田间地头用水)来说并不具有成本效益。吕宏兴等<sup>[25]</sup>根据美国国家航空咨询委员会(National Aviation Advisory Committee, NACA)发布的机翼形厚度的参数表达式, 结合小阻力曲线量水技术, 提出了机翼形量水槽。为解决机翼形量水槽施工和制图过程较复杂的问题, 同时探索新的量水装置设计思路, 本文在机翼形量水槽的研究基础上, 简化了机翼形复杂的曲线方程, 得到双弧形结合的曲线型量水设备, 并设计仿机翼形便携式量水装置, 通过在矩形水槽中进行水工模型试验, 结合 FLOW-3D 数值模拟结果建立测流公式并对其进行验证。该研究可为改进量水方法、提高用水效率提供设计参考, 对促进中国灌区小截面便携式量水槽的推广具有实用价值。

## 1 仿机翼形便携式量水槽

### 1.1 简化过程

机翼形量水槽是由吕宏兴等<sup>[25]</sup>根据文丘里量水槽研究出的一种量水槽。其机翼形曲线多项式方程为

$$y = 10P \left[ 0.2969 \sqrt{\frac{x}{C}} - 0.126 \frac{x}{C} - 0.3516 \left( \frac{x}{C} \right)^2 + 0.2843 \left( \frac{x}{C} \right)^3 - 0.1015 \left( \frac{x}{C} \right)^4 \right] \quad (1)$$

式中  $P$  为翼高, m;  $C$  为翼长, m;  $x$  为横坐标值;  $y$  为纵坐标值。

翼高和翼长是机翼形曲线变化的主要控制参数, 在对机翼形的简化过程中, 保持原有翼长  $C$  和翼高  $P$  不变, 喉口位置保持在  $0.3C$  处。为满足原有机翼形光滑连接要求, 并且使  $y$  值误差较小, 选用椭圆弧和圆弧的连接方式, 即喉口断面上游用  $1/4$  椭圆弧代替, 下游用一段相切的圆弧代替。图 1a 为现有机翼形和简化后的对比, 实线为机翼形, 虚线为简化后所得仿机翼形, 图 1b 为收缩比 0.5、翼高 15 cm、翼长 70 cm 的模型简化图。

仿机翼形量水槽上游  $1/4$  椭圆方程和下游圆弧半径  $R$  (m) 分别为

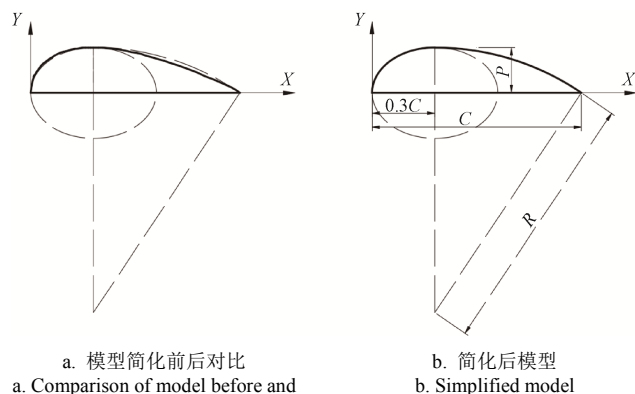
$$\frac{x^2}{0.09C^2} + \frac{y^2}{P^2} = 1 \quad (2)$$

$$R = \frac{P}{2} + 0.245 \frac{C^2}{P} \quad (3)$$

### 1.2 简化后量水槽结构

仿机翼形量水槽合并后中轴线与矩形水槽中轴线重合(图 2), 称为仿机翼形便携式量水槽。合并体形宽度最大宽度  $B$  为

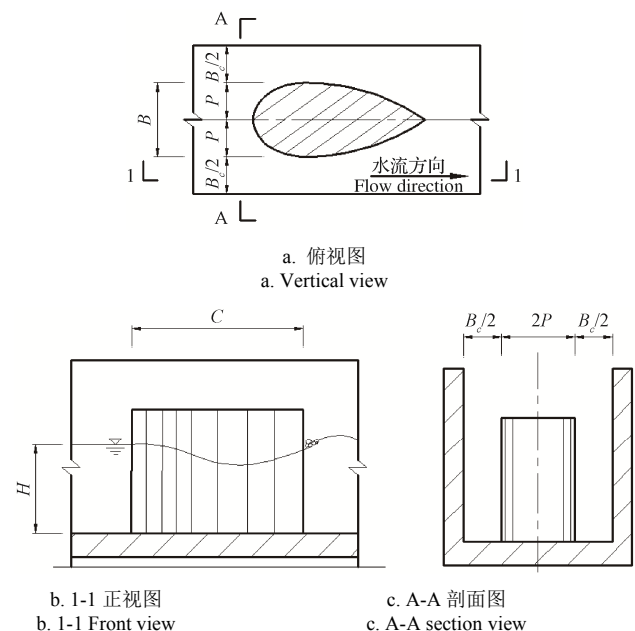
$$B = 2P \quad (4)$$



注: 实线为机翼形, 虚线为简化后所得仿机翼形。C 为翼长, m; P 为翼高, m; R 为圆弧半径, m。下同。  
Note: The solid line is the airfoil shape, and the dotted line is the simplified airfoil shape. C represents the length of the airfoil, m; P represents the height of the airfoil, m; R represents the radius of the circle, m. Same as below.

图 1 仿机翼形模型简化图

Fig.1 Simplified diagram of imitating airfoil shape model



注: 阴影部分为水工模型; B 为水工模型最大宽度, m; H 为上游水深, m;  $B_c$  为最小过流宽度, m。下同。  
Note: Shaded part represents hydraulic model; B represents maximum width of the hydraulic model, m; H represents upstream water depth, m;  $B_c$  represents minimum overflow width, m. Same as below.

图 2 仿机翼形结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of imitating airfoil shape structure

## 2 水工模型试验

### 2.1 模型试验布设概况及试验过程

试验于西北农林科技大学水工水力学实验室进行, 试验渠道长 17 m, 宽 70 cm, 高 100 cm, 平坡, 断面形状为矩形(图 3)。根据试验渠道和长度和宽度, 为保证足够的过水宽度和平稳的水位测点, 选择翼长为 70 cm、6 组不同收缩比的试验模型(表 1), 模型材料为木制空心, 外部包裹有不透水铁皮。根据中国农田常用灌溉流量范围 10~50 L/s, 每组模型设置 7 组不同的流量, 分别为 15.3、19.4、25.0、30.6、35.1、41.7 和 47.2 L/s, 共设计试验方案 42 种。采用 SCM60 型水位测针测量其对应的上游测点水深(距上游进水口 5 m)、喉口水深(距上

游进水口 10 m) 和下游水深 (距上游进水口 15 m)。5 和 15 m 测点处测量左中右三点水深并取平均值, 其中 5 m 测点处结合相同测点水深计算佛汝德数; 10 m 测点处分为两个流道, 分别测量各流道左中右水深并取平均值, 根据流速和上游测点处水深, 计算上游佛汝德数。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} \quad (5)$$

式中  $v$  为量水槽上游流速, m/s;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $H$  为上游测点水深, m。试验所取收缩比及对应量水设备宽度见表 1。

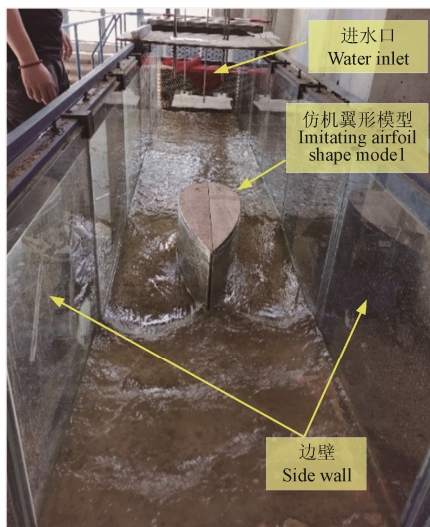


图 3 模型试验装置

Fig.3 Model test facility

表 1 试验模型参数表

Table 1 Parameter table of test models

编号 Serial number	收缩比 Contraction ratio $\varepsilon$	体形宽度 Body width/cm
1	0.537	32.4
2	0.571	30.0
3	0.606	27.6
4	0.657	24.0
5	0.674	22.8
6	0.709	20.4

## 2.2 水工模型试验结果分析

### 2.2.1 上游佛汝德数

在明渠测流中, 佛汝德数是一个重要的无量纲数, 保证测流精度的重要条件。上游佛汝德数过大, 会导致水面波动较大, 给水深的测量带来较大的误差。

由试验数据可以看出, 所有工况下佛汝德数均小于 0.5, 满足测流规范要求<sup>[26]</sup>。总体上, 佛汝德数随着收缩比的增大而增大, 并且随着流量的增大呈先增大后减小的变化趋势 (图 4)。当流量达到 25~30 L/s 时, 佛汝德数达到极大值。因此量水槽适宜收缩应该小于 0.709, 以保证满足测流精度和渠道安全的要求。依据本次试验数据结果, 收缩比在不小于 0.537 的条件下, 上游佛汝德数均可以满足测流规范。

### 2.2.2 壅水高度

水流从上游流入量水槽, 由于量水槽束窄渠道, 流

速迅速增大, 水位随之降低。水流经过量水槽后渠道变宽, 流速下降, 水位升高, 水流汇集形成水跃。在这个过程中, 上游的水位由于一定的阻水作用会有所升高, 即壅水高度  $H_y$  (m), 指在水流流态稳定后上游水深  $H$  (m) 与下游水深  $h$  (m) 的差值

$$H_y = H - h \quad (6)$$

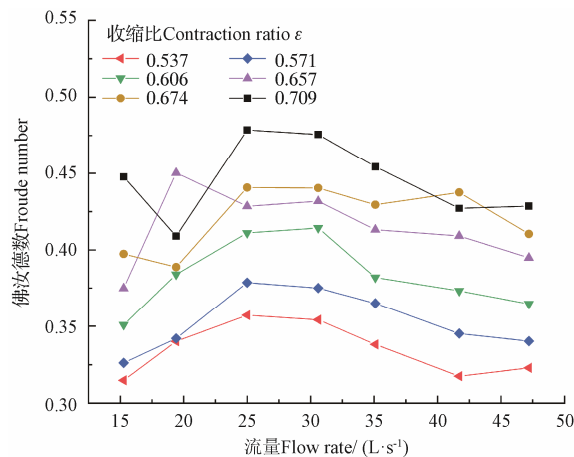


图 4 佛汝德数与流量和收缩比的关系

Fig.4 Relationships between Froude number and flow rate and contraction ratio

结果表明, 仿机翼形量水槽的上游壅水高度最大值为 6.32 cm, 最小值 0.46 cm, 平均值 3.25 cm, 该量水槽的上游壅水高度比较小 (图 5)。总体上, 壅水高度随着流量的增大而增大, 随收缩比增大而减小。根据连续性方程, 渠道内流速增大, 量水槽上游的阻水作用会引起动能转化为势能, 导致水流势能增加, 水深增加, 上游壅水高度增大; 收缩比越小, 过流断面面积越小, 对量水槽上游的抬升作用就越强, 上游壅水高度越大。本次水工模型试验所有工况条件下, 壅水高度均小于 7 cm。双流道输水壅水高度略大于单流道壅水高度, 为满足渠道上游安全需求, 尽量减小壅水高度, 适宜收缩比范围为 0.606~0.709, 收缩比 0.606 条件下的平均测流误差为 6.95%, 收缩比 0.709 条件下的平均测流误差为 4.91%。此收缩比范围条件下, 试验所得数据壅水高度小于 5 cm。

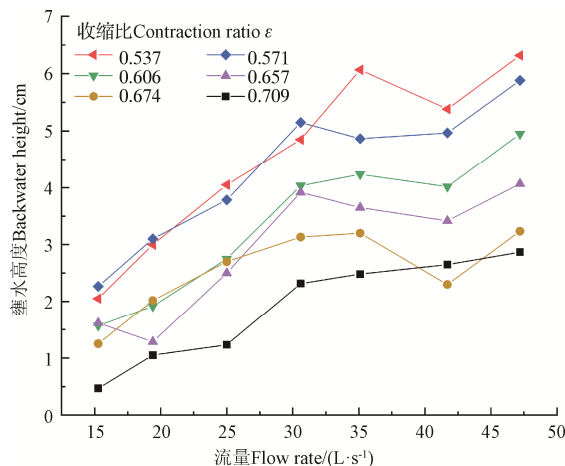


图 5 壅水高度与流量和收缩比的关系

Fig.5 Relationships between backwater height and flow rate and contraction ratio

### 3 仿机翼形便携式量水槽水力特性数值模拟研究

本研究采用数值模拟方法,基于 FLOW-3D 进行仿机翼形量水槽研究,首先将数值模拟和模型试验所得数据中的上游和喉口水深进行对比,验证模拟的准确性后,进一步分析水工模型试验中较难得到的水力学参数,减少试验的时间和成本。水工模型试验共设计 6 组收缩比、1 组翼长、7 组流量工况条件下的仿机翼形量水槽。在重复水工试验模型的 42 种工况后,数值模拟增加 2 组收缩比(0.550、0.630)、3 组翼长(65、75、80 cm)的数值模拟模型,并选取与水工模型试验相同的 7 组流量。

#### 3.1 模型建立

根据设计的量水槽具体尺寸,利用 AutoCAD 分别建立不同收缩比的量水槽三维数值物理模型。模型进水口的右下角放置于坐标原点。 $X$ 轴正方向为水流的流向, $Y$ 轴正方向指向渠道左壁,重力加速度反方向为 $Z$ 轴正方向。由于水工模型试验中水深均不超过 30 cm,为提高数值模拟的准确性和效率,将矩形水槽高度由 100 降低至 30 cm,以减少固定网格数。其余各选项设置均为默认。

#### 3.2 网格划分以及边界条件的设定

FLOW-3D 中采用 FAVOR 技术对模型进行网格划分。采用六面体网格,覆盖全部模型的网格单元边长为 2 cm;总网格数量为 315 760 个。设置上游进口流量进口边界,不设定液面高度和内容填充,默认水流沿与边界垂直方向流入且整个边界充满流体;下游出口设置为自由出流边界;渠道底部以及侧壁均选择墙边界;渠道顶部设定为对称边界,即无液体穿过该边界。除此之外不做任何设置。

#### 3.3 计算模型选取及数值求解

选取重力模型和湍流模型进行数值模拟求解计算。其中,重力模型中只对重力进行设置,在 $Z$ 方向上设置其为 $-9.81 \text{ m/s}^2$ ;采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型进行数值模拟,各项参数默认。默认使用有限差分法将模拟控制方程处理为代数方程组后求解计算,对流项默认即采用二阶迎风格式离散,扩散项默认即采用二阶中心差分格式离散,迭代的最小步长值设为 $10^{-6} \text{ s}$ ,数据写入时间间隔为 2 s。采用 TruVOF 方法<sup>[27]</sup>加速对模型自由表面的处理,大大减少计算模型时达到稳定状态所需的时间,也保证了计算精度。

#### 3.4 数值模拟结果验证

在水工模型试验中测量渠道上游和喉口处测点水位,将其与数值模拟结果对比,以得到本次数值模拟的准确性。上游测点处水深实测值与模拟值的误差均能控制在 4.50%以内,最大值为 4.48%,最小值为 0.29%,均值为 1.56%;喉口测点处水深实测值与模拟值的误差均能控制在 5.50%以内,最大值为 5.10%,最小值为 0,均值为 2.26%。对比结果证明了 FLOW-3D 在计算上的准确性,具体如表 2 所示。

#### 3.5 数值模拟结果分析

##### 3.5.1 佛汝德数

根据数值模拟的结果,对矩形渠道整体区域的佛汝

德数进行分析。明渠量水槽的槽前佛汝德数应小于 0.5,以保证上游水流流速不会过大导致形成驻波。在模型试验中,验证了所有试验工况下上游水深测点处的佛汝德数,均满足测流规范。在水流稳定的情况下,流量为 30.6 L/s、收缩比为 0.571 工况下的沿程佛汝德数见图 6。从水流的流态方面考虑,水流在进入量水槽前均属于缓流,在量水槽入口处渠道变窄,水流流速增大且水深减小,佛汝德数开始增大;在喉口段附近,水流为临界流,佛汝德数等于 1;水流经过束窄段后仍在加速,水深继续降低,水流流态为急流;发生水跃后,由于水流质点相互冲击消能,流速减缓,水深增加,水流重新变为缓流,佛汝德数小于 1。

##### 3.5.2 流速分布

仿机翼形量水槽的上游水流稳定,流速变化较小。主要研究收缩断面及其下游的沿程流速变,分析流量 30.6 L/s、收缩比 0.571 的工况,得出沿程流速分布情况(图 7)。水流从量水槽上游接近量水槽入口时,由于渠道过流面积减小,水流流速增大;喉口段,水流继续加速,但是由于两侧水流受边壁束窄影响较大,在同样长的时间内,两侧水流流过更长的距离,因此两侧水流流速大于中部水流;到达水跃附近断面,水流加速,在仿机翼形尾部,发生水跃处(部分工况)流速达到最大值,但是由于已经处于量水槽下游扩散段,两侧的水流因为汇聚的相互碰撞,流速开始减缓;量水槽下游,过槽水流继续扩散,两侧水流与中部水流流速均减缓,水流有继续向外扩散的趋势,受到渠道边壁阻挡,水流重新向中部交汇,水流总体逐渐恢复稳定。

##### 3.5.3 流线分布

流线分布可以直观地反映出流场中水流的流动趋势,结合流速分布可以得到水流流态的变化情况。设置与流速分布计算时相同的工况,绘制出水流的流线(图 8)。量水槽上游,流线顺直,相互平行,且流速较低;量水槽入口段,由于渠道的束窄作用,流线沿量水槽边壁开始向内弯曲,越靠近渠道侧壁弯曲越明显;水流进入两侧束窄段后,流速增大,在量水槽末端流速达到最大值 1.13 m/s;进入下游扩散段,两侧水流流线沿量水槽边壁向渠道中轴线汇聚,流速减小,水槽中部水流在左右水流汇集和水跃的影响下,流线交错混乱,流速为最小值 0.05 m/s;在量水槽出口处,两侧水流继续向中间汇聚,流线向中部弯曲,中部水流流线与两侧水流流线相互交汇,中部水流流速增大,流线回归平稳。

#### 3.6 测流公式的建立及误差分析

本研究矩形渠道中有 2 个对称的流道,与机翼形量水槽单流道过水方式不同。机翼形量水槽的测流公式推导过程中,涉及到的参数均与过水流道数量无关,变量为过水横截面宽度,可以采用双流道过水横截面的最小宽度之和代替原公式中单流道过水宽度。采用吕宏兴等<sup>[25]</sup>在机翼形量水槽量纲和谐的测流公式(7),计算本研究所得水深与流量关系:

$$Q = a^{1.5} g^{0.5} B_c^{2.5-1.5n} H^{1.5n} \quad (7)$$



表 2 上游、喉口测点处水深对比  
Table 2 Comparison of water depths at upstream and throat measuring points

收缩比 Contraction ratio	流量 Flow rate (L·s <sup>-1</sup> )	上游测点 Upstream measuring point			喉口测点 Throat measuring point		
		试验水深	模拟水深	相对误差	试验水深	模拟水深	相对误差
		Test water depth/cm	Simulated water depth/cm	Relative error/%	Test water depth/cm	Simulated water depth/cm	Relative error/%
0.537	15.3	7.88	7.66	-2.83	3.92	3.94	0.60
	19.4	8.78	8.75	-0.38	5.02	5.12	2.06
	25.0	10.07	9.94	-1.26	5.40	5.26	-2.59
	30.6	11.58	12.01	3.68	5.80	5.98	3.10
	35.1	13.08	13.42	2.57	6.40	6.62	3.44
	41.7	15.32	15.44	0.81	7.78	7.73	-0.69
	47.2	16.45	16.25	-1.22	8.07	8.03	-0.45
0.571	15.3	7.70	7.98	3.64	3.82	3.80	-0.44
	19.4	8.75	8.86	1.26	4.88	4.99	2.18
	25.0	9.68	9.25	-4.48	5.27	5.13	-2.59
	30.6	11.15	11.1	-0.45	5.52	5.56	0.79
	35.1	12.45	12.75	2.41	6.15	6.15	0.00
	41.7	14.48	14.25	-1.61	7.58	7.51	-0.97
	47.2	15.88	15.99	0.67	7.83	7.68	-1.96
0.606	15.3	7.33	7.46	1.73	3.58	3.76	4.93
	19.4	8.10	8.25	1.85	4.70	4.66	-0.85
	25.0	9.17	8.99	-1.93	4.92	5.03	2.31
	30.6	10.43	10.24	-1.85	5.33	5.21	-2.31
	35.1	12.07	12.31	2.02	5.90	5.76	-2.37
	41.7	13.75	13.96	1.53	7.32	7.16	-2.14
	47.2	15.17	15.25	0.55	7.57	7.42	-1.94
0.657	15.3	7.02	6.94	-1.09	3.42	3.44	0.68
	19.4	7.28	7.43	2.01	4.52	4.65	2.95
	25.0	8.92	8.83	-0.97	4.78	4.77	-0.28
	30.6	10.15	10.01	-1.38	5.17	5.23	1.23
	35.1	11.45	11.66	1.83	5.50	5.76	4.73
	41.7	12.93	12.85	-0.64	6.70	6.56	-2.09
	47.2	14.38	14.17	-1.48	7.20	7.45	3.47
0.674	15.3	6.75	6.63	-1.78	3.33	3.44	3.20
	19.4	8.03	8.01	-0.29	4.40	4.46	1.36
	25.0	8.75	8.89	1.60	4.63	4.85	4.68
	30.6	10.02	9.92	-0.97	5.03	5.23	3.91
	35.1	11.17	11.35	1.64	5.43	5.62	3.44
	41.7	12.37	12.54	1.40	6.43	6.64	3.21
	47.2	14.02	13.87	-1.05	6.97	7.01	0.62
0.709	15.3	6.23	6.15	-1.34	3.52	3.54	0.66
	19.4	7.77	7.88	1.46	4.12	4.02	-2.35
	25.0	8.28	8.39	1.29	4.40	4.56	3.64
	30.6	9.52	9.37	-1.54	4.72	4.88	3.46
	35.1	10.75	10.98	2.14	4.85	4.97	2.47
	41.7	12.57	12.47	-0.77	5.82	5.52	-5.10
	47.2	13.62	13.57	-0.34	6.45	6.61	2.48

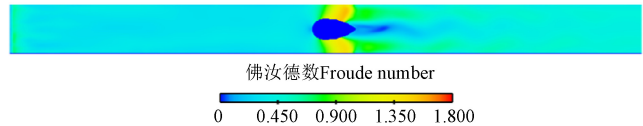


图 6 矩形渠道水流佛汝德数沿程变化图  
Fig.6 Variation diagram of flow Froude number in rectangular channel

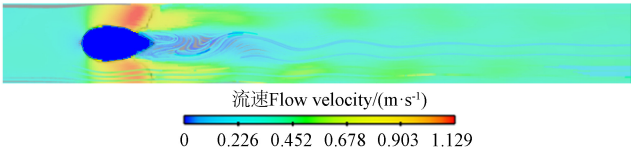


图 8 矩形渠道流线分布  
Fig.8 Streamline distribution in rectangular channel

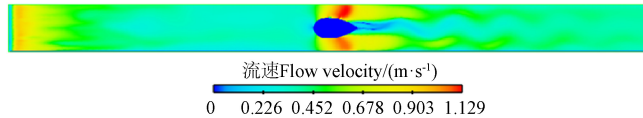


图 7 矩形渠道水流流速分布图  
Fig.7 Distribution diagram of flow velocity in rectangular channel

式中  $Q$  为流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $B_c$  为最小过流宽度,  $\text{m}$ ;  $H$  为上游水深,  $\text{m}$ ;  $a$ 、 $n$  为常数, 通过水工模型试验和数值模拟所得数据分析确定。在对数坐标系中有<sup>[18]</sup>

$$\ln \left[ \frac{H_k}{B_c} \right] = n \ln \left[ \frac{H}{B_c} \right] + \ln a \quad (8)$$

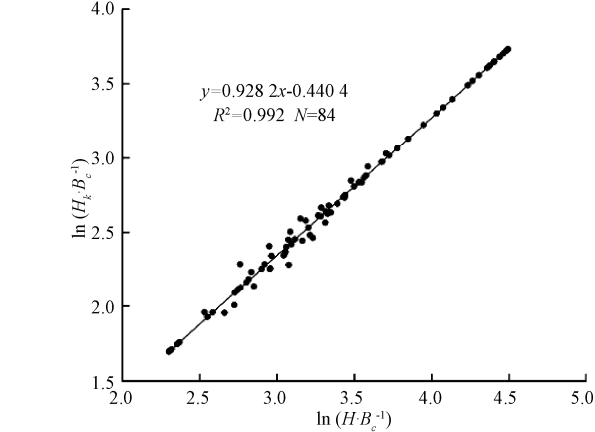
式中  $H_k$  为过水截面最小宽度处水深即临界水深, m, 在对数坐标系中, 采用水工模型试验和数值模拟所得到的共 84 种工况下获得的上游水深和临界水深拟合分析获取公式, 绘制出其对数线性关系, 在常规坐标系中进行线性拟合, 即可获得  $n$  和  $a$  的值。

不同翼长、不同收缩比和不同流量工况下所有数据均呈现非常好的线性关系 (图 9), 拟合得到  $n=0.928\ 2$ ,  $a=0.516\ 4$ 。

将上述结果代入式 (8) 中, 得到矩形渠道仿机翼形便携式量水槽测流公式为

$$Q=0.516\ 4g^{0.5}B_c^{1.107\ 7}H^{1.392\ 3}\tag{9}$$

将水工模型试验测得 42 组上游水深代入式 (9) 中, 所得计算流量与实测流量平均相对误差为 6.34% (表 3), 满足中国农田灌区测流精度的要求。



注:  $H_k$  为临界水深, m。  
Note:  $H_k$  is the critical water depth, m.

图 9 测流公式数据拟合线

Fig.9 Flow measurement formula data fitting line

表 3 实测流量与计算流量误差  
Table 3 Measured flow and calculated flow error

收缩比 Contraction ratio	实测流量 Measured flow rate/(L·s <sup>-1</sup> )	计算流量 Calculated flow rate/(L·s <sup>-1</sup> )	相对误差 Relative error/%	收缩比 Contraction ratio	实测流量 Measured flow rate/(L·s <sup>-1</sup> )	计算流量 Calculated flow rate/(L·s <sup>-1</sup> )	相对误差 Relative error/%
0.537	15.3	15.92	4.25	0.657	15.3	16.92	10.83
	19.4	18.51	-4.61		19.4	17.83	-8.11
	25.0	22.37	-10.50		25.0	23.63	-5.49
	30.6	27.20	-11.10		30.6	28.30	-7.53
	35.1	32.23	-8.18		35.1	33.47	-4.65
	41.7	40.14	-3.75		41.7	39.65	-4.91
	47.2	44.33	-6.08		47.2	45.98	-2.59
0.571	15.3	16.50	8.05	0.674	15.3	16.50	8.05
	19.4	19.71	1.61		19.4	21.02	8.37
	25.0	22.70	-9.20		25.0	23.68	-5.28
	30.6	27.63	-9.72		30.6	28.58	-6.59
	35.1	32.21	-8.23		35.1	33.25	-5.26
	41.7	39.76	-4.65		41.7	38.33	-8.08
	47.2	45.21	-4.21		47.2	45.64	-3.32
0.606	15.3	16.44	7.68	0.709	15.3	15.60	2.17
	19.4	18.88	-2.65		19.4	21.19	9.23
	25.0	22.43	-10.26		25.0	23.18	-7.28
	30.6	26.86	-12.21		30.6	28.12	-8.10
	35.1	32.89	-6.28		35.1	33.32	-5.07
	41.7	39.45	-5.39		41.7	41.41	-0.69
	47.2	45.23	-4.18		47.2	46.31	-1.89

4 讨 论

机翼形量水槽相比于其他量水设备具有水头损失小、渠道阻水小、流量计算公式简单、壅水高度小等优点。本研究对固定式机翼形量水槽简化设计后, 得到仿机翼形便携式量水槽。便携式量水设备主要适用于末级灌区德小型渠道。通过分析水工模型试验和数值模拟的结果, 发现简化并没有改变原机翼形的固有优点, 而且施工简单, 测流精度高。Di Stefano 等<sup>[28]</sup>在 Samani 等<sup>[12-13]</sup>工作的基础上得到矩形渠道圆柱形量水槽测流公式, 其中流量  $Q$  是  $H$  与  $B_c$  的函数, 与本研究所得测流公式形式一致, 测流误差也略高于仿机翼形量水槽。该研究测流公式是由喉口水深和

上游水深拟合得到的, 水工模型试验中双流道水深测量共 6 次, 由于模型制作不规则和与渠道中轴线未完美重合等原因, 导致双流道喉口水深测量出现了误差, 导致部分工况下的测流误差较大。本文分析了仿机翼形量水槽壅水高度等特点, 分析了其泥沙不易淤积的水力特性, 但是并未进行含沙水流试验, 研究方法还有待改进。该研究采用 Flow-3D 软件, RNG  $k-\epsilon$  三维湍流模型进行数值模拟, 相较于标准的  $k-\epsilon$  模型可以更好地处理高应变率以及流向弯曲程度较大的流动。TruVOF 方法较传统的 VOF 方法提高了收敛效率, 对自由液面的描述也更加精确。网格划分所采用的 FAVOR 技术, 可以用较少的网格处理不平整的区域, 在保证运算精度的前提下尽量少地占用资源。从沿程

佛汝德数、水流流线等水力性能细节分析, 数值模拟方法相较于传统的水工模型试验更有优势, 为解决灌区量水问题提供了更高的精度和效率, 也可为量水槽体型优化和简化提供便利。

## 5 结 论

依据现有量水槽研究的实际情况, 本研究采用水工模型试验与数值模拟相结合的方法完整的研究了仿机翼形量水槽的水力特性, 主要研究结果如下:

1) 仿机翼形量水槽有较大的自由出流范围, 测流灵活性强。仿机翼形量水槽的槽前壅水高度最大值 6.32 cm, 最小值 0.46 cm, 均值 3.25 cm。壅水高度较小, 有利于减小渠道施工挖方量和渠道材料用量。量水槽计算所得佛汝德数均小于 0.5, 满足测流规范要求。

2) 利用 FLOW-3D 软件增加了 3 组量水槽翼长、2 组收缩比的矩形渠道仿机翼形便携式量水槽数值模拟。结合机翼形量水槽的测流公式, 拟合获得其各参数值, 得到仿机翼形量水槽水位流量公式。所得仿机翼形量水槽测流公式精度高, 平均测流误差为 6.34%。

3) 本次研究仿机翼形便携式量水槽工况流量范围为 15.3~47.2 L/s。壅水高度和佛汝德数等水力参数限制下, 建议选择收缩比范围 0.606~0.709, 收缩比 0.606 条件下测流平均误差为 6.95%, 收缩比 0.709 条件下平均测流误差 4.91%。本次研究翼长范围为 65~80 cm, 均满足灌区量水要求, 实际工程中渠道宽度为 70 cm 时, 建议翼长范围 65~80 cm。

## 【参 考 文 献】

- [1] 王长德. 量水技术与设施[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [2] Cone V M. The Venturi flume[J]. Journal of Agricultural Research, 1917, 9(4): 116-129.
- [3] Parshall R L. The Improved Venturi Flume[M]. Fort Collins: Colorado Agricultural College, 1928: 1-87.
- [4] Skogerboe G V, Hyatt M L, England J D, et al. Measuring Water with Parshall flumes[R]. USA: Utah Water Research Laboratory, 1966: 1-49.
- [5] 徐宝林, 崔丽杰. 巴歇尔槽测量精度研究[J]. 吉林水利, 2004(8): 15-16.  
Xu Baolin, Cui Lijie. Study on the test precision of Baxeer Slot[J]. Jilin Water Resources, 2004(8): 15-16. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李华. 宽喉道巴歇尔水槽水力特性的研究[J]. 水文, 1988(1): 38-43.  
Li Hua. Hydraulic performance experimental research on wide-throat Parshall flume[J]. Journal of China Hydrology, 1988(1): 38-43. (in Chinese with English abstract)
- [7] 徐义军, 韩启彪. 我国灌区量水槽研究概述[J]. 节水灌溉, 2012(5): 56-59.  
Xu Yijun, Han Qibiao. Summary of current research on measuring flume in irrigation districts of China[J]. Water Saving Irrigation, 2012(5): 56-59. (in Chinese with English abstract)
- [8] 蔡勇, 李同春. 灌区量水设施分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(2): 13-15.
- [9] 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. Structure Optimization and Discharge Calculation Method of New Type Flume for Flow Measurement in Irrigation District[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [10] Hager W H. Modified venturi channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1985, 111(1): 19-35.
- [11] Hager W H. Mobile flume for circular channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1988, 114(3): 520-534.
- [12] Samani Z, Magallanez H. Measuring water in trapezoidal canals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(1): 181-186.
- [13] Samani Z, Magallanez H. Simple flume for flow measurement in open channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(2): 127-129.
- [14] Badar A M, Ghare A D. Development of discharge prediction model for trapezoidal canals using simple portable flume[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 1(5): 37-42.
- [15] Wright S J, Tullis B P, T M Long. Recalibration of Parshall flumes at low discharges[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1994, 120(2): 348-362.
- [16] 肖苡轲, 王文娥, 胡笑涛. 基于 FLOW-3D 的田间便携式短喉槽水力性能数值模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 55-61.  
Xiao Yizhou, Wang Wen'e, Hu Xiaotao. Numerical simulation of hydraulic performance of field portable short-throat trough based on FLOW-3D[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(3): 55-61. (in Chinese with English abstract)
- [17] Kolavani F L, Bijankhan M, Di Stefano C, et al. Experimental study of central baffle flume[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2019, 145(3): 62.
- [18] Bijankhan M, Ferro V. Experimental study on triangular central baffle flume[J]. Flow Measurement and Instruments, 2019, 70: 101641.
- [19] Hager W H. Modified trapezoidal venturi channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1986, 112(3): 225-241.
- [20] Kapoor A, Ghare A D, Vasudeo A D, et al. Channel flow Measurement using portable conical central baffle[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2019, 145(11): 06019010.
- [21] Samani Z. Three simple flumes for flow measurement in open channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(6): 04017010.
- [22] Ghare A D, Kapoor A, Badar A M. Cylindrical central baffle flume for flow measurements in open channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2020, 146(9): 06020007.
- [23] Ghare A D, Badar A M. Experimental studies on the use of mobile cylinders for measurement of flow through rectangular channels[J]. International Journal of Civil Engineering, 2014, 12(4): 504-511.
- [24] 潘志宝, 吕宏兴, 魏溪. 灌区量水槽的应用研究现状与进展[J]. 西北农林科技大学: 自然科学版, 2007, 35(4): 214-217.

- Pan Zhibao, Lyu Hongxing, Wei Xi. Current applied research and advances of measuring flume in irrigation district[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2007, 35(4): 213-217. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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 (Transactions of the CSAE), 2006, 22(9): 119-123. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孙斌, 吕宏兴, 张宽地, 等. U 形渠道机翼形量水槽水跃数值模拟与试验研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(1): 65-71.
- Sun Bin, Lyu Hongxing, Zhang Kuandi, et al. Numerical simulation and experimental research of hydraulic jumps on the airfoil-shaped measuring flume in U-shaped canal[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(1): 65-71. (in Chinese with English abstract)
- [28] Di Stefano C, Di Piazza G V, Ferro V. Field Testing of a simple flume (SMBF) for flow measurement in open channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(2): 235-240.

## Hydraulic performance experiments and numerical simulation of portable water measuring flume of imitating airfoil shape

He Mengyang<sup>1</sup>, Shang Haixin<sup>1</sup>, Zhang Kuandi<sup>1,2\*</sup>, Ling Peng<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Accurate, simple, and rapid water measurement in the field is highly required for the planned water use and water-saving agriculture in most irrigation areas, particularly in the last small cross-section irrigation districts. In this study, a measuring device was proposed in an airfoil-like shape with a simple structure, according to the conventional airfoil-shaped flow measuring flume. The simple structure of the airfoil-shaped measuring device was applied to the small cross-section flow measurement of the rectangular channel. A hydraulic model test was carried out in the Laboratory of Hydraulic Engineering and Hydraulics of Northwest A&F University of China in 2020. A plexiglass rectangular channel flume was designed with a size of 17 m×70 cm×100 cm. Flow flume models were all made of hollow wooden materials. A total of 42 test schemes were designed, including 1 set of airfoil length, 6 sets of contraction ratios, and 7 sets of flow rates. A better hydraulic performance was presented in the numerical simulation than before, such as Froude number and flow streamline. A FLOW-3D software was also used to supplement several sets of models to evaluate the simulation accuracy, and the hydraulic performance. Specifically, the upstream Froude number (less than 0.5) was verified to meet the national standard requirements. The position of the throat produced the critical flow, whereas, the downstream resumed the slow flow. The average height of backwater was 3.25 cm, while the maximum was 6.32 cm, and the minimum was 0.46 cm. A total of 84 datasets were obtained from the hydraulic model test and numerical simulation. The flow formula of the portable airfoil-shaped flume was achieved, where the average relative error was 6.34%, meeting the requirements of the last small cross-section channel. The flow rate range of the flume was 15.3-47.2 L/s. An optimal combination of hydraulic parameters was achieved, where the range of shrinkage ratio from 0.606 to 0.709, with an average error of 6.95% under shrinkage ratio of 0.606, while 4.91% under shrinkage ratio of 0.709. The airfoil length ranged from 65 to 80 cm, all of which were suitable for the specific irrigation area. Correspondingly, it was suggested that the airfoil length ranged from 65 to 80 cm, when the channel width was 70 cm in the practical field. In addition, the double channel in the flow measurement device demonstrated that the entrance was flush, and the central axis was parallel in the center of the rectangular water tank. There was no gap between the bottom of the fixture and the channel surface during installation. The symmetrical model was well sealed at the joint of the central axis of the channel for a higher accuracy of flow measuring precision. Consequently, the simplified airfoil-shaped flume can be expected for the higher safety of measuring channel, concurrently remaining the excellent performance. This finding can provide a promising economic and practical support to the higher performance of measuring water and the efficiency of water use, particularly to the popularization of small-section portable flow measurement flume in most irrigation districts.

**Keywords:** flow measurement; numerical simulation; portable equipment; imitated airfoil shape; rectangular channel