

# 仿舵型量水槽体形模拟研究

李伟<sup>1</sup>, 张新燕<sup>1,2\*</sup>, 刘朝阳<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.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】探索具有水流平顺、流态稳定、测流准确、水头损失小等优良特性的量水槽线形。【方法】针对基于水下装备流线型体构造的量水槽, 选取4种量水槽体形, 运用数值模拟方法研究不同体形的量水槽在不同流量条件下的流速分布、水面线、佛汝德数、水头损失、壅水高度等水力性能。【结果】流线型体扩散段较陡时, 仿舵型量水槽的壅水高度和水头损失相对较小。不同流量条件下, 4种体形的量水槽上游佛汝德数均低于0.5; 壅水高度均低于3 cm; 计算流量与模拟流量的平均误差为2.42%, 测流精度较高, 且均具有较小的水头损失。【结论】卡克斯仿舵型量水槽在各流量条件下的水面线均较为平稳且流速分布更加均匀, 在不同流量条件下其水头损失均小于0.35 cm, 测流精度大于98.27%, 水力性能最优, 可作为仿舵型量水槽的基本体形。

**关键词:** 矩形渠道; 仿舵型量水槽; 数值模拟; 流线型体

中图分类号: S565

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021551

OSID:



李伟, 张新燕, 刘朝阳. 仿舵型量水槽体形模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 118-123.

LI Wei, ZHANG Xinyan, LIU Zhaoyang. The Impact of Geometry of Rudder-like Flume on Its Performance and Accuracy[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 118-123.

## 0 引言

【研究意义】灌区量水是灌区管理部门进行正确引水、输水和水量调配的主要手段, 是发展节水型农业和实现农业高效用水的关键技术。因此, 探索结构简单、水力性能优良、量水精度高、满足灌区需求的渠道量水设施具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。堰槽类量水设施具有经济实用且稳定可靠的特点, 适合在灌区大规模推广应用。【研究进展】在过去, 量水设施的体形由初期的巴歇尔量水槽、无喉道量水槽、直壁式量水槽等易于产生边界层分离、水力特性复杂、量测难度较大的折线形体型发展到了抛物线形量水槽<sup>[3]</sup>、半圆柱形量水槽<sup>[4]</sup>、机翼形量水槽<sup>[5-6]</sup>等水流平顺、流态稳定、测量精度高的曲线形体型。近年来, 随着数值模拟技术的发展, CFD技术被广泛应用于量水槽体形设计。许虎<sup>[7]</sup>以巴歇尔量水槽为研究对象, 模拟分析了量水槽进口连接段形式对水面线、水头损失、测流精度、流速及压强等水力性能的影响, 确定出水力性能最优的进口段形式。宋金妍<sup>[8]</sup>通过对经典翼形量水槽与优化翼形量水槽2种体形的量水槽的水力特性进行对比分析, 得出优化翼形量水槽的流速分布、水面线、

佛汝德数、测流精度等水力性能较优。杨珮珮<sup>[9]</sup>通过对适用于弧底梯形渠道的新型无喉道量水槽在不同收缩比和喉口边坡系数条件下的水流特性研究, 分析了其收缩比和喉口边坡系数的最佳取值范围, 确定了量水槽的最优体型参数。以往研究均在现有量水设施的基础上, 通过改变量水槽局部形状(连接段)或参数(边坡系数)进行量水槽体形的设计优化。【切入点】而结合灌区实际需求, 根据渠道水力特性, 研究量测精度高、适应性好、水力性能优良的新型量水设备——仿舵型量水槽的研究较少。【拟解决的关键问题】为此, 本研究基于潜水设备外形构造, 通过几何组合法、源汇法、线形拟合等方法设计并拟合4条流线型构造的量水槽体形, 基于FLOW-3D软件对量水槽水力性能进行数值模拟研究, 寻求仿舵型量水槽的最优体型, 以期为推动智慧型现代化灌区建设和精细化管理提供技术支撑。

## 1 模型建立

### 1.1 量水槽结构与流线型

仿舵型量水槽的基本结构由上游收缩段、下游扩散段和喉口段3部分组成, 如图1所示。基于潜水设备的外形构造选取的4种流线型如图2所示, 分别为: 半椭圆+半椭圆线型(EE型)、半椭圆+抛物线线型(EP型)、卡克斯线型(KKS型)、CB/Z-237引申的离散线型(CBD型)<sup>[10]</sup>。4种线型均由数学方程控

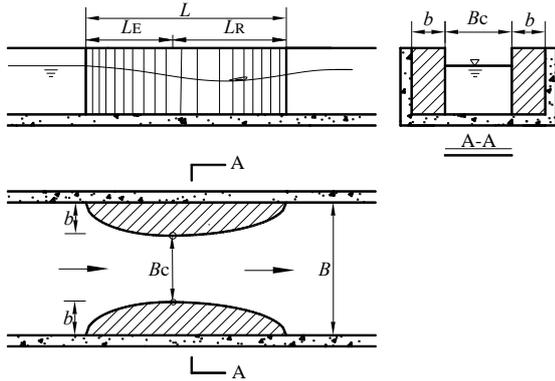
收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900701)

作者简介: 李伟(1998-), 男, 陕西延安人。硕士研究生, 主要从事水力学与水工建筑物研究。E-mail: lw18821702791@163.com

通信作者: 张新燕(1972-), 女, 河南开封人。副教授, 博士, 主要从事节水灌溉技术与设备研究工作。E-mail: xnzxy@163.com

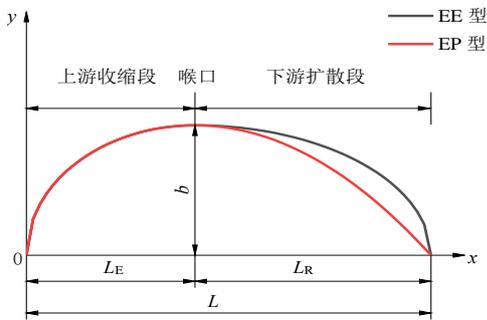
制，其中，EE 型与 EP 型的线形（图 2（a））收缩段及扩散段均较陡，曲率半径均较大。



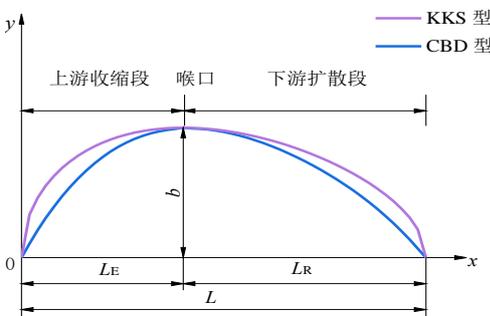
注  $L$  为量水槽槽长； $b$  为槽厚； $B_c$  为喉口宽度； $B$  为渠道宽度； $L_E$  和  $L_R$  分别为收缩段和扩散段长度。

图 1 仿舵型量水槽结构

Fig.1 Structure diagram of rudder-like flume



(a) EE 型和 EP 型



(b) KKS 型和 CBD 型

图 2 流线型线形

Fig.2 Streamline shapes

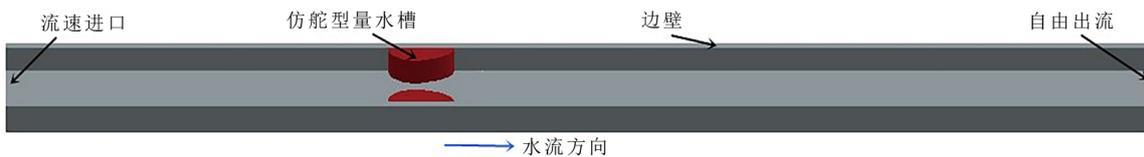


图 3 仿舵型量水槽三维模型及边界设置

Fig.3 Three-dimensional model and boundary setting of rudder-like flume

通过多次网格划分并以相同初始条件计算出口流量进行网格密度分析，结果如图 4 所示。考虑在保证精度的前提下节约计算资源，最终取网格数为 357 000，即计算区域单元网格长度整体设置为 0.02 m。

型的线形（图 2（b））收缩段及扩散段均较陡，曲率半径均较大。

## 1.2 数学模型

### 1.2.1 控制方程和湍流模型

将过槽水流视为不可压缩的三维黏性液体，根据水流运动特性，采用 RNG  $k-\varepsilon$  紊流模型进行模拟研究，控制方程如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

湍动能  $k$  方程：

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率  $\varepsilon$  方程：

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： $t$  为时间 (s)； $\rho$  为水密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )，取值为 1 000； $u_i$ 、 $u_j$  分别为流速矢量在  $x_i$ 、 $x_j$  方向上的分量 ( $i, j=1, 2, 3$ ) ( $\text{m}/\text{s}$ )； $\mu$  为流体动力黏滞系数 ( $\text{kg}/(\text{m s})$ )，取值为  $1.005 \times 10^{-3}$  ( $\text{N s}/\text{m}^2$ )； $k$  为湍动能 ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )； $\varepsilon$  为湍动耗散率 ( $\text{kg m}^2/\text{s}^3$ )； $\mu_{\text{eff}}$  为流体的有效动力黏滞系数； $G_k$  为平均流速梯度引起的湍动能  $k$  的产生项。

### 1.2.2 边界条件及网格划分

本研究建立的量水槽三维立体模型如图 3 所示。仿舵型量水槽模型的槽长为 0.6 m，槽厚为 0.12 m，收缩比为 0.6。模型放置在长 12 m、宽 0.6 m、高 0.3 m 的矩形平底渠道上，量水槽的槽首距离渠道进口 4 m。渠道进口边界设定为流速进口，设定流速及水位以改变流量；出口设为自由出流；渠道边壁选择无滑移固体边壁；自由水面与空气交界面设为对称边界。

由于量水槽曲线较为复杂且附近流场变化剧烈，因此将量水槽处的网格进行加密，量水槽局部加密网格划分如图 5 所示，设置为 0.01 m，最终整个计算区域网格总数为 504 000。

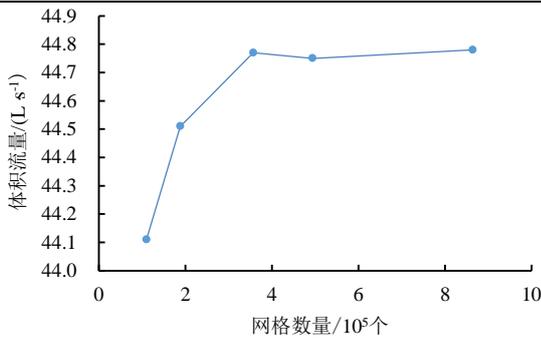


图4 网格无关性检验

Fig.4 Grid independence check

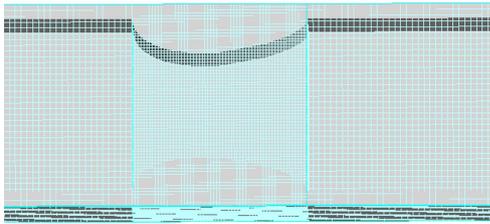


图5 局部加密网格划分

Fig.5 Local grid division diagram

## 2 模拟结果分析

### 2.1 水流流态

图6为不同体形量水槽 $Fr$ 沿程变化(过流量 $Q=44.92\text{ L/s}$ )。不同线形的量水槽过槽水流变化趋势基本一致,槽前水流由于受到量水槽的阻挡,水位壅高,流速减小,佛汝德数 $Fr < 0.5$ 。4种线形的量水槽进水前端线形圆滑,进槽水流均无边界层分离现象,水流顺畅,紧贴槽壁,流态平稳。在收缩段由于束窄作用,水流流速增大,水深减小,发生水跃过渡到下游急流,并在喉口断面下游附近发生临界流,在扩散段末端附近形成水深最小、流速最大的收缩断面,随后发生水跃与下游渠道缓流相接。

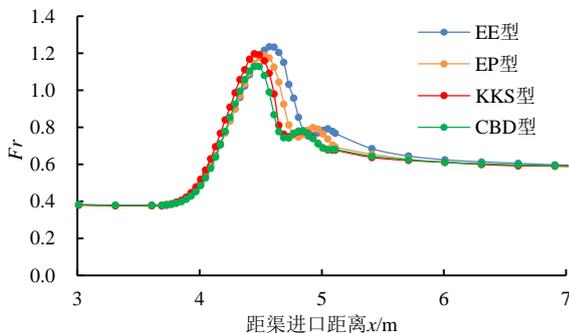
图6  $Fr$ 沿程变化

Fig.6 The longitudinal variation of Froude number

槽前 $Fr$ 变化较小且未超过0.4,从槽前( $x=3.6\text{ m}$ )到槽进口( $x=4\text{ m}$ )处 $Fr$ 开始逐渐增大,在槽进口处达到0.43,仍小于0.5,即各线型量水槽均满足测流规范中的上游佛汝德数不大于0.5的基本要求。在槽

收缩段断面收缩,水面跌落,水深减小, $Fr$ 增大,在喉口下游附近形成临界流,在出口处形成收缩断面, $Fr$ 达到最大。不同体形量水槽收缩断面位置略有不同,其 $Fr$ 最大值也有所差异。 $Fr$ 最大值由大到小依次为EE型、KKS型、EP型和CBD型,其中EE型 $Fr$ 最大,为1.22; CBD型 $Fr$ 最小,为1.12。4种线型量水槽跃前断面均处于槽扩散段,其水跃发生位置及跃前断面 $Fr$ 与线形之间存在联系。EE型和KKS型扩散段更陡,其水跃发生位置离喉口更远,且其跃前断面 $Fr$ 更大。由此可见,流线型体量水槽扩散段越陡时,其水跃越接近扩散段下游发生,跃前断面 $Fr$ 越大。

### 2.2 水面线

由于形体差异,不同流量条件下量水槽水面线变化规律基本相似,但相同流量条件下各量水槽之间仍存在差异。以流量 $Q=44.92\text{ L/s}$ 时量水槽水面线变化为例(图7)。可以看出,水面线整体变化趋势一致,但收缩水深大小有所差异。量水槽上游水流平缓,在槽前水深稍有降低,受量水槽收缩影响,水面在槽进口( $x=4\text{ m}$ )开始迅速降落,水深快速减小。喉口断面面积最小,理论上在该断面会形成临界流,但由于受边界影响,临界流断面发生在喉口下游某处,此时水流由缓流过渡到临界流,之后水流受扩散段作用继续跌落,在距槽进口4.5 m附近形成水深最小、流速最大的收缩断面,之后发生水跃与下游缓流相衔接。

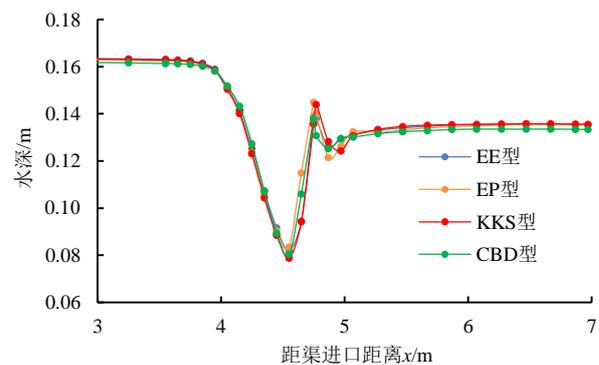


图7 水面线变化

Fig.7 Variation of water surface line

仿舵型量水槽特征水深及断面位置如表1所示。4种体型量水槽临界流断面发生在喉口下游3~5 m处,其中CBD型临界水深值最大,为12.11 cm,而KKS型临界流断面发生位置距喉口断面最近,可提高临界流断面位置的确定及临界水深的测量精度。各种体型量水槽收缩断面均发生在量水槽出口附近,KKS型收缩水深最小,为7.74 cm,最大为EP型,8.35 cm。由此可以得出,流线型体量水槽扩散段越陡,收缩断面位置距槽喉口越远,收缩水深越小。

表 1 仿舵型量水槽特征水深及断面位置

Table 1 Characteristic depths of rudder-like flume

流线型体	EE 型	EP 型	KKS 型	CBD 型
临界流断面位置 $x_1$ /cm	5	4	3	5
临界水深/cm	11.65	11.98	11.56	12.11
收缩断面位置 $x_2$ /cm	24	21	24	21
收缩水深/cm	8.07	8.35	7.74	8.03

注  $x_1, x_2$  为距量水槽喉口处的水平距离。

### 2.3 流速分布

由图 8 可知, 4 种线型的量水槽上游流速基本相同。流速在槽前 ( $x=3.6$  m) 处开始快速增大, 在收缩断面达到最大值, 流速最大值由大到小依次为 KKS 型、EE 型、CBD 型和 EP 型。KKS 型流速最大, 1.24 m/s, CBD 型最小, 为 1.18 m/s。经过收缩断面之后流速迅速减小, 在槽后逐渐稳定。从线形来看, 扩散段较陡的 EE 型和 KKS 型流速上限较高。即流线型体量水槽扩散段越陡时, 流速最大值越大。

### 2.4 水头损失

水头损失是衡量量水设施优劣的重要技术指标之一。明渠流水头损失由沿程水头损失和局部水头损

失组成。由于量水槽内水头损失主要为水跃产生的能量损失, 故只计算水跃产生的局部水头损失。表 2 为量水槽在流量  $Q=44.92$  L/s 时的水跃特征参数及能量损失。4 种仿舵型量水槽的跃前断面均位于量水槽扩散段, 跃前水深略有差异, 最大为 EP 型, 其次为 EE 型; KKS 型跃长最小, CBD 型跃长最大; 4 种线形量水槽的最大跃高相差不大。能量损失最少的是 KKS 型量水槽, 最大的是 EP 型量水槽。

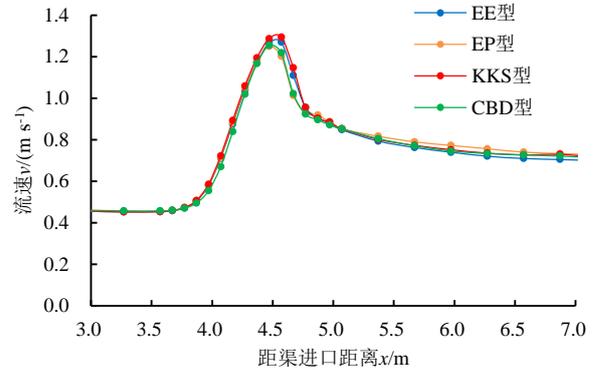


图 8 中轴线纵向流速沿程变化

Fig.8 Variation of longitudinal velocity along axis

表 2 仿舵型量水槽水跃特征参数及能量损失

Table 2 Hydraulic jump energy loss of rudder-like flume

流线型体	跃前断面位置/cm	跃前水深/cm	跃后断面位置/cm	跃后水深/cm	跃长/cm	跃高/cm	水跃能量损失 $\Delta E$ /cm
EE 型	59	8.07	85	12.97	26	4.90	0.281
EP 型	55	8.35	81	13.62	26	5.27	0.322
KKS 型	59	7.74	83	12.47	24	4.73	0.274
CBD 型	55	8.03	85	13.12	30	5.09	0.313

注  $x_3, x_4$  为距量水槽进口处的距离。

### 2.5 壅水高度

水流流经渠道砌筑量水槽时必然会形成收缩, 从而抬高上游水深, 造成一定程度壅水。壅水高度为某一流量水流流经量水槽时相对应的上游水深与未修筑量水槽渠道通过同一流量水流的正常水深差值, 壅水高度过大, 水流溢出, 造成流量损失及量测误差。4 种体形量水槽在  $Q=44.92$  L/s 时的上、下游水深及壅水高度如表 3 所示。可以看出, 量水槽的壅水高度均不大, 其中 KKS 型的壅水高度最小, 为 2.78 cm, 之后由小到大依次为 EE 型、CBD 型、EP 型。不同流量条件下壅水高度有所不同, 但均小于 3 cm, 满足规范标准要求。从体形上看, EE 型扩散段较 EP 型陡, KKS 型较 CBD 型扩散段也更陡, 而 KKS 型和 EE 型的壅水高度都更小, 即流线型体量水槽扩散段越陡时, 壅水高度越小。

表 3 仿舵型量水槽壅水高度

Table 3 Backwater height of rudder-like flume

流线型体	上游水深 $h_1$ /cm	下游水深 $h_2$ /cm	壅水高度 $\Delta h$ /cm
EE 型	16.35	13.49	2.86
EP 型	16.32	13.40	2.92
KKS 型	16.35	13.57	2.78
CBD 型	16.30	13.41	2.89

### 2.6 测流精度

量水槽的测流精度是衡量其性能优劣的重要指标之一。表 4 为计算流量与模拟流量的误差。可以看出, 计算流量与模拟流量的最大相对误差为 3.76%, 最小相对误差仅为 0.69%, 4 种体形量水槽的平均误差为 2.42%, 其中 KKS 型量水槽在各流量条件下的平均误差最小, 为 1.73%, 测流精度最高。

表 4 仿舵型量水槽计算流量与模拟流量误差

Table 4 Comparison between calculated flow and simulated flow of rudder-like flume

流线型体	计算流量/ (L s <sup>-1</sup> )	模拟流量/ (L s <sup>-1</sup> )	相对误差/%	平均误差/%
EE 型	20.93~48.85	21.21~49.34	1.31~3.29	2.47
EP 型	21.15~49.45	20.87~49.35	2.34~3.76	2.73
KKS 型	21.25~48.67	21.40~49.32	0.69~2.61	1.73
CBD 型	20.85~49.17	21.45~49.29	1.17~3.25	2.73

### 3 讨论

近年来,随着灌区量水技术的不断发展,量水槽形式由折线形式逐渐转变为曲线形式,主要原因是折线形容易产生流线与边壁分离现象,且水力特性复杂,量测难度较大,而曲线形式的外部形状符合水流流线分布、边界层分离现象弱,水流阻力小。本文采用水下设备的设计思路与方法,利用灌区渠道水流水力特性去探求最佳流线型体以应用于新型的测量精准、适用度高、应用方便、性能优良的渠道量水设备——仿舵型量水槽。

本研究中,卡克斯型量水槽在各流量条件下的水面线均较为平稳且流速分布更加均匀,水力性能较好,因此建议将其作为仿舵型量水槽基本形体。这与肖华攀等<sup>[11]</sup>认为半椭圆+圆弧流线型的阻力特性最好的研究结果存在差异。原因在于后者为了探求流线型体结构的设计方法,在几种常用流线型体轮廓方程基础上,对比分析不同结构参数下 4 种线形二维流线型体的水下阻力特性研究,而本研究是将 4 种线形与矩形渠道结合构成仿舵型量水槽,进一步研究其水力性能得出结论;且其针对各线形的阻力特性进行研究,而本研究综合考虑流速分布、水面线、佛汝德数、水头损失、壅水高度等水力性能;另外由于线形收缩段长度的变化也会对阻力性能产生影响,因此得到的结论有一定的差异。贺梦杨等<sup>[12]</sup>对矩形渠道机翼柱形量水槽进行了模型试验和数值模拟研究,其流量公式计算误差为 6.34%,高于本研究的平均测流误差(2.42%),这是由于其考虑的是圆柱体放置在中间的情况,与本文放置方式的不同导致了测流精度的差异。刘鸿涛<sup>[13]</sup>基于 Fluent 软件,对 U 形渠道半圆柱量水槽进行了数值模拟。紊流模型采用标准  $k-\varepsilon$  模型,VOF 法追踪自由液面的模拟方法,试验流量与模拟流量平均误差达到 3.77%,同样满足数值模拟对精度的要求,但误差略高于使用本研究误差,也侧面验证了本方法对量水槽研究的适用性。

另外,研究通过对上游佛汝德数、流速分布、水头损失等水力性能分析后发现在相同收缩比条件下,量水槽扩散段越陡,壅水高度和水头损失越小,与宋

金妍<sup>[8]</sup>通过对量水槽的结构形式、测流机理进行分析研究将经典翼形量水槽与优化翼形量水槽的水力特性对比模拟分析之后的结果具有一致性,说明量水槽线形曲线对量水槽水力性能影响较大,可以通过调整线形来达到提高水力性能的目的,也可为量水槽体形的进一步优化和简化提供便利<sup>[14-17]</sup>。

### 4 结论

1) 4 种形体量水槽模型在各流量条件下公式计算流量与模拟流量平均误差为 2.42%,测量精度较高。上游佛汝德数均小于 0.5,上游易形成平稳缓流。壅水高度和水头损失均较小,满足既成渠道的应用要求。

2) 在相同收缩比条件下,量水槽扩散段越陡,壅水高度和水头损失越小。

3) KKS 型在试验条件下,流速分布更为均匀,流态更为稳定,测流精度最高;其模型计算流量与模拟流量平均误差仅为 1.73%,水头损失小于 0.35 cm,壅水高度小于 3 cm;水力性能最优,可作为仿舵型量水槽的基本体型。

### 参考文献:

- [1] 陈志恺. 中国水资源的可持续利用问题[J]. 水文, 2003(1): 1-5.  
CHEN Zhikai. Sustainable utilization of water resources in China[J]. Hydrology, 2003(1): 1-5.
- [2] 康绍忠. 加快推进灌区现代化改造,补齐国家粮食安全短板[J]. 中国水利, 2020(9): 1-5.  
KANG Shaozhong. Accelerate the modernization of irrigation districts to complement national food security short board[J]. China Water Conservancy, 2020(9): 1-5.
- [3] 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, 2001, 20(2): 55-57.  
LYU Hongxing, ZHU Xiaqun, ZHANG Chunjuan, et al. Selection and design of U-shaped channel parabolic throat flume[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(2): 55-57.
- [4] 蒋沛, 陈新明. U 形渠道半圆柱形量水槽的数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 68-72.  
JIANG Pei, CHEN Xinming. Numerical simulation of semi-cylindrical U-shaped channel flume[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 68-72.
- [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 Xiaqun, et al. Experimental study on airfoil-shaped flume[J]. Agricultural Engineering Journal, 2006, 22(9): 119-123.
- [6] 孙斌. 矩形渠道机翼形量水槽水力特性数值模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.  
SUN Bin. Numerical simulation of hydraulic characteristics of rectangular channel airfoil-shaped flume[D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University, 2010.
- [7] 许虎. 量测一体化巴歇尔槽数值模拟与结构优化研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2021.  
XU Hu. Numerical simulation and structural optimization of integrated

- Bachelles[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021.
- [8] 宋金妍. 翼型量水槽水力特性数值模拟及体型类比研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.  
SONG Jinyan. Numerical simulation of hydraulic characteristics and shape analogy of airfoil flume[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [9] 杨珮珮. 弧底梯形无喉道量水槽的数值模拟与体型优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.  
YANG Peipei. Numerical simulation and shape optimization of an arc bottom trapezoidal throatless flume[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [10] 722 研究所. CB/Z 237—87[S]. 北京: 中国船舶工业总公司, 1987.  
722 Research Institute. CB/Z 237—87[S]. Beijing: China State Shipbuilding Industry Corporation, 1987.
- [11] 肖华攀, 方子帆, 朱陈何, 等. 水下流线型体的结构阻力特性及其应用研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2013, 35(6): 92-96.  
XIAO Huapan, FANG Zifan, ZHU Chenhe, et al. Structural resistance characteristics of underwater streamlines and their applications[J]. Journal of Three Gorges University (Natural Science Edition), 2013, 35(6): 92-96.
- [12] 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.  
HE Mengyang, SHANG Haixin, ZHANG Kuandi, et al. Hydraulic characteristics test and numerical simulation of airfoil-like portable flume[J]. Agricultural Engineering Journal, 2021, 37(12): 117-124.
- [13] 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 trapezoidal channel airfoil-column flume[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 101-107.
- [14] 胡云进, 万五一, 蔡甫款, 等. 窄深矩形断面明渠流速分布的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008(1): 183-187.  
HU Yunjin, WAN Wuyi, CAI Fukuan, et al. Study on velocity distribution of narrow and deep rectangular open channel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2008(1): 183-187.
- [15] 槐文信, 赵明登, 童汉毅. 河道及近海水流的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
HUAI Wenxin, ZHAO Mingden, TONG Hanyi. Numerical simulation of river and offshore currents[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [16] 冉聃聃, 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 Danjie, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Design of trapezoidal throatless flow tank and its hydraulic performance simulation and test [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 177-183.
- [17] 杜月中, 闵健, 郭字洲. 流线形回转体外形设计综述与线形拟合[J]. 声学技术, 2004, 23(2): 93-102.  
DU Yuezhong, MIN Jian, GUO Zizhou. Overview of shape design and linear fitting of streamlined revolution[J]. Acoustic technology, 2004, 23(2): 93-102.

## The Impact of Geometry of Rudder-like Flume on Its Performance and Accuracy

LI Wei<sup>1</sup>, ZHANG Xinyan<sup>1,2\*</sup>, LIU Zhaoyang<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Construction Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering Ministry of Education Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 Flume is a hydraulic device widely used in hydraulic engineering projects. Its performance depends on many factors. In this paper, we explore the alignment of measuring flume with smooth flow, stable flow pattern, accurate flow measurement and small head loss, based on the streamline structure of underwater equipment.

【Method】 Four flumes with different streamline shapes were studied. Numerical simulation was used to study their hydraulic performance under different flow rates, including velocity distribution, water surface profile, Froude number, water head loss and backwater height. 【Result】 It is found that the backwater height of the flume and the head loss both decreased when the diffusion became steeper. The upper Froude numbers of the four flumes were less than 0.5, regardless of the flow rates. The backwater heights were less than 3 cm. The average error between the measured and simulated flow rate was less than 2.42%, indicating that the flow measurement is accurate, and the head loss is small. 【Conclusion】 The water surface profile of the KKS type flume is more stable, and the velocity distribution is more uniform under different flow rates, compared to other flumes. Its head loss is less than 0.35 cm, the flow measurement accuracy is more than 98.27%. Its hydraulic performance is hence the best among the flumes we compared.

**Key words:** rectangular channel; rudder-like measuring flume; numerical simulation; streamline shape

责任编辑: 韩 洋