第 46 卷 第 1 期
2018 年 1 月

西北农林科技大学学报(自然科学版)
Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.)

Vol. 46 No. 1
Jan. 2018

网络出版时间:2017-11-29 09:24 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.01.019
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20171129.0924.038.html

梯形渠道梯形喉口量水槽水力特性初探

冉聃颉,王文娥,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] 【目的】设计一种体型简单、过流能力强的梯形渠道梯形喉口量水槽,为提高小流量时的测流精度和减小大流量时的水头损失提供支持。【方法】对梯形渠道 4 种喉口收缩比 ε(0.427,0.506,0.557,0.681)的梯形喉口量水槽,分别在 12 种流量(15.39 L/s,19.44 L/s,23.62 L/s,29.39 L/s,35.91 L/s,39.15 L/s,45.00 L/s,49.59 L/s,54.28 L/s,61.15 L/s,65.70 L/s,71.96 L/s)工况下的测流精度、水头损失、临界淹没度、适宜喉口收缩比等水力性能进行试验研究,通过观测 15 个控制断面的水深分析水面线的变化规律及流量与收缩比、上游水深的关系,并对自由出流条件下的流量公式进行拟合。【结果】梯形喉口量水槽的上游水深与流量间存在良好的指数关系,相关系数高达 0.998 6;设计梯形喉口的量水槽有效改善了梯形渠道测流的测流误差和水头损失,喉口收缩比为 0.427~0.557 时,实测流量与计算流量的最大相对误差为 4.643%;喉口收缩比为 0.506~0.681 时,水头损失最大为上游总水头的 12%左右,较长喉道水头损失有所减小;梯形喉口量水槽具有较高的临界淹没度,临界淹没度变化范围为 0.85~0.93;综合考虑水头损失及测流精度,较适宜的喉口收缩比为 0.506~0.557,喉口倾角为 70°~78°。【结论】梯形喉口量水槽为灌区梯形渠道量水槽的设计提供新思路。

[关键词] 梯形渠道;梯形喉口量水槽;喉口收缩比;流量公式;量水精度;水头损失

[中图分类号] S274.4 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2018)01-0146-09

Hydraulic performance of trapezoidal-throated flume in trapezoidal channel

RAN Danjie, 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, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 Trapezoidal channel is commonly used in irrigation area. This study designed a trapezoidal-throated flume with simple shape and strong flow capacity to provide support for improving accuracy of flow measurement at low flow rate and reducing head loss at high flow rate. 【Method】 Experiments were conducted under 12 flow rates (15.39 L/s, 19.44 L/s, 23.62 L/s, 29.39 L/s, 35.91 L/s, 39.15 L/s, 45.00 L/s, 49.59 L/s, 54.28 L/s, 61.15 L/s, 65.70 L/s, and 71.96 L/s) to determine the hydraulic performance of trapezoidal channels including flow measurement formula, water surface profile, head loss and flow measurement precision with four contraction ratios (ε=0.427, 0.506, 0.557, and 0.681). The variation of water surface line and the relationships between flow and shrinkage ratio and upstream water depth were analyzed through water depths at 15 control sections. The flow rate formulas under free flow conditions were also fitted. 【Result】 The upstream depth and flow rate of trapezoidal channels had good ex-

[收稿日期] 2016-11-18
[基金项目] 公益性行业(农业)科研专项(201503125);"十三五"国家重点研发计划项目(2016YFC0400200);杨凌示范区科技计划项目(2015NY-30)
[作者简介] 冉聃颉(1993-),女(土家族),重庆彭水人,在读硕士,主要从事水力学及河流动力学研究。
E-mail:r18629429253@gmail.com
[通信作者] 王文娥(1975-),女,河南孟县人,教授,博士生导师,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

ponential relationship with coefficient of 0.998 6. When the contraction ratio was within 0.427 to 0.557, the fitted discharge formula met the flow measurement accuracy, and the maximum error between the measured and calculated discharge was 4.643%. When the contraction ratio was within 0.506 to 0.681, the maximum water head loss was less than 12% of the total head, which was lower comparing to long-throat flume. The trapezoidal-throated flume had high critical submergence of 0.85－0.93. Considering water head loss and accuracy of measuring flow, the proper ratio of contraction was 0.506－0.557, and the proper throat angle was 70°－78°.【Conclusion】This study provides reference for further research and application of water measuring facility in North China.

Key words: trapezoidal channel; trapezoidal-throated flume; throat contraction ratio; flow formula; flow measurement accuracy; head loss

渠道输水是我国灌区输水的主要形式[1]，进行渠道量水是保证灌区正确引水、配水和用水的重要手段[2]。目前研究人员和灌区管理部门已经研制了大量渠道量水设施，各种形式的长喉道量水槽、短喉道量水槽、无喉道量水槽已经得到实际应用[3]。但现有的量水槽在实际运用和推广过程中仍存在一些问题，如巴歇尔量水槽是短喉道量水槽中最具代表性的一种，它具有喉道短、尺寸小、精度高等特点，但必须严格按照标准尺寸修建，存在结构复杂、造价高、施工困难等不足[4]；长喉道量水槽存在喉道长、尺寸大、造价相对较高的不足；无喉道量水槽在巴歇尔量水槽基础上去掉了喉道段，在陕西的引沁、引渭灌区得到了应用，具有体型简单、经济、便于布置的特点[5]，但由于折线形渠道中无喉道量水槽主要采用矩形喉口[6]，而梯形渠道是灌区最常见的输水渠道，应用矩形喉口无喉道量水槽测流时由于喉口形状与渠道断面形状差异大，大流量时水头损失较大，小流量情况下水位低，测流误差大[7]，量水精度较低。另外，我国北方灌区小型渠道底坡一般较缓，泥沙、杂物淤积问题严重，影响量水设施的工作性能[8]，目前常用的渠道量水建筑物很难达到小流量时量水精度高的要求。基于以上原因，本研究在矩形喉口无喉道量水槽的基础上，根据梯形渠道断面特点，设计了一种梯形喉口量水槽，通过过槽水流水力性能试验建立关键断面水深与流量关系，分析影响量水精度的相关因素，以期为灌区渠道量水技术的研究与应用提供参考。

1　试验设计

1.1　试验渠道概况

试验在陕西杨凌西北农林科技大学节水灌溉试验站进行，试验渠道为预制混凝土梯形渠道，渠道综合糙率(n)取 0.013，几何参数为渠底宽 0.3 m，渠深 0.6 m，渠道边坡比 1∶1，渠长 34 m，渠道底坡 1/2 000。

1.2　量水槽设计

根据梯形断面的几何特性，在梯形渠道上设置侧向收缩的量水槽，水流在槽前为缓流，在侧向收缩的影响下，水面在收缩段有一定程度的降落，形成临界流[9]。根据临界流的水力特性，自由出流时收缩段上游水流不受下游水流影响，从而可通过上游某关键断面较稳定水深准确推算出各种工况下的流量。梯形喉口量水槽底部为渠道底部，喉口断面为梯形，喉口断面底宽小于渠道底宽，槽进口段边墙按 1∶3 收缩，槽出口段边墙按 1∶6 扩散。设计参数主要包括梯形喉口的底宽和喉口边坡倾角(边墙与水平面夹角)。本试验中量水槽高度为 0.35 m，在实际推广时可按渠道过水最大流量设计量水槽高度。图 1 为梯形喉口量水槽的结构示意图，4 种不同喉口收缩比(4 种不同喉口边坡倾角)量水槽的基本参数见表 1。

1.3　试验装置与方法

试验系统平面布置如图 2。本试验系统由水泵、供水管道、蓄水池、稳水池、梯形渠道、梯形喉口量水槽、尾门、出水池和回水管道构成，稳水池入口设有薄壁三角堰，用于量测入渠流量。在渠道中下游修建梯形喉口量水槽，量水槽喉口距渠道进口 22 m，量水槽的中轴线与梯形渠道的中轴线重合。

试验取槽内 13 个过水断面和槽上下游各 1 个断面(断面 1 和断面 15)共 15 个断面来测量相关水力特性参数，测流控制断面从上游至下游依次编号为 1～15。断面 1 在槽上游距槽进口 2 m 处，断面 15 在槽下游距槽出口 2 m 处，断面 2～14 布置如图 1 所示。其中，断面 2 为量水槽进口断面，断面 8 为量水槽喉口断面，断面 14 为量水槽出口断面，各控制断面距喉口断面的具体位置如表 2 所示。在 12

种不同流量(15.39 L/s,19.44 L/s,23.62 L/s,29.39 L/s,35.91 L/s,39.15 L/s,45.00 L/s,49.59 L/s,54.28 L/s,61.15 L/s,65.70 L/s,71.96 L/s)工况下进行了4种不同收缩比的量水槽共48组自由出流试验。试验通过调节阀门来控制过槽流量的大小,实测流量通过薄壁三角堰测量公式计算[10],使用SCM60型水位测针测量各控制断面水深,精度为0.1 mm。流量与三角堰堰上水头关系为:

$$Q=1\ 343\ H^{2.47}。\tag{1}$$

式中:Q为流量,L/s;H为薄壁三角堰堰上水头,m。

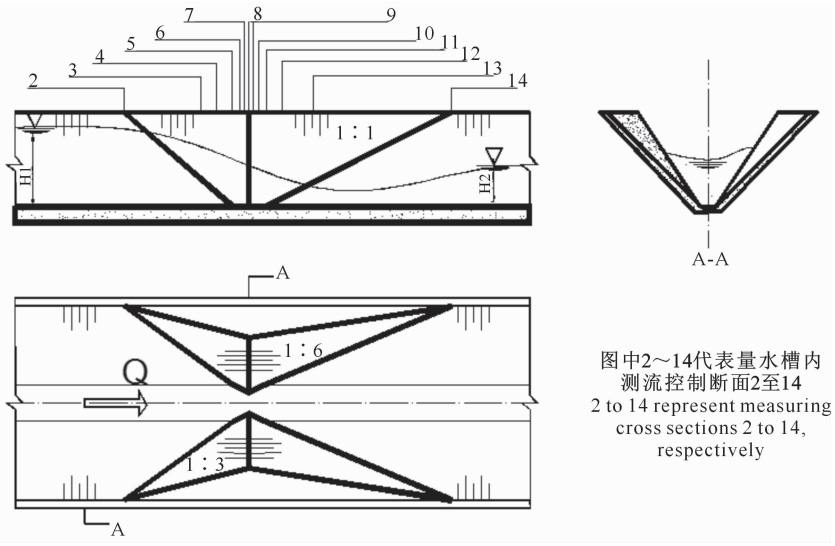

图1 梯形喉口量水槽结构示意图

Fig. 1 Structure sketch and section division of trapezoidal-throated flume

表1 梯形喉口量水槽的基本体型参数

Table 1 Basic parameters of trapezoidal-throated flume

序号 Number	喉口收缩比(ε) Throat contraction ratio	喉口边坡倾角(θ)/(°) Slope angle of throat	喉口底宽(b)/mm Bottom width of throat	收缩段长度/m Length of entrance section	扩散段长度/m Length of exit section
1	0.681	60	220	0.563	1.127
2	0.557	70	196	0.825	1.650
3	0.506	78	196	0.984	1.968
4	0.427	90	192	1.212	2.424

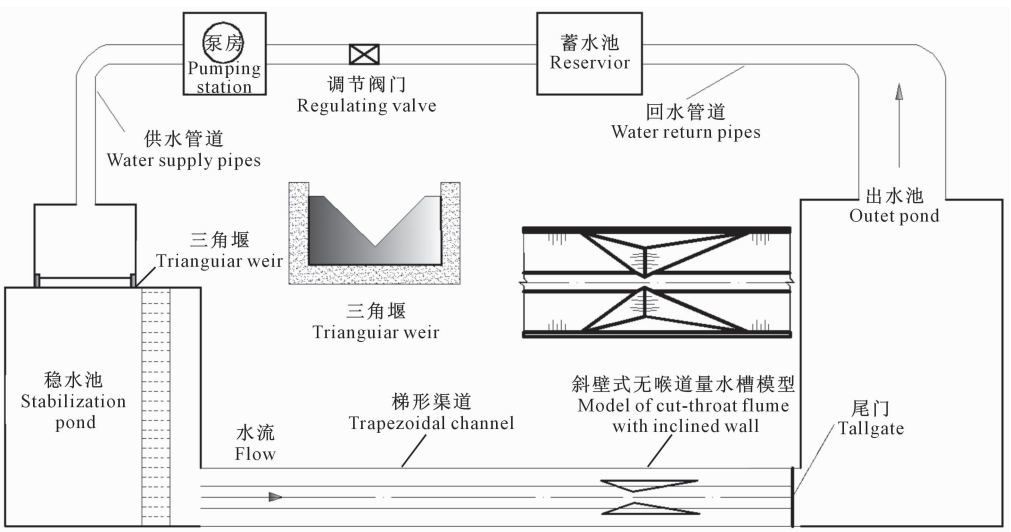

图2 试验系统平面布置图

Fig. 2 Layout of the experimental setup

表 2　15 个测流断面距槽进口断面距离

Table 2　Distance from second section to each control section

断面序号 Section number	距槽进口断面距离(L)/cm Length from second section	断面序号 Section number	距槽进口断面距离(L)/cm Length from second section	断面序号 Section number	距槽进口断面距离(L)/cm Length from second section
1	−200	6	77.6	11	94.6
2	0	7	80.6	12	104.6
3	52.6	8	83.6	13	134.6
4	62.6	9	86.6	14	250.8
5	72.6	10	89.6	15	450.8

2　结果与分析

2.1　水面线

水流通过梯形喉口量水槽时，受到量水槽侧向收缩的影响，槽内水深发生明显变化，水面急剧下降，通过喉口断面进入扩散段内将形成水跃，水面升高，水深加大。图 3 为不同流量下不同喉口收缩比的梯形槽内各控制断面水深变化情况。

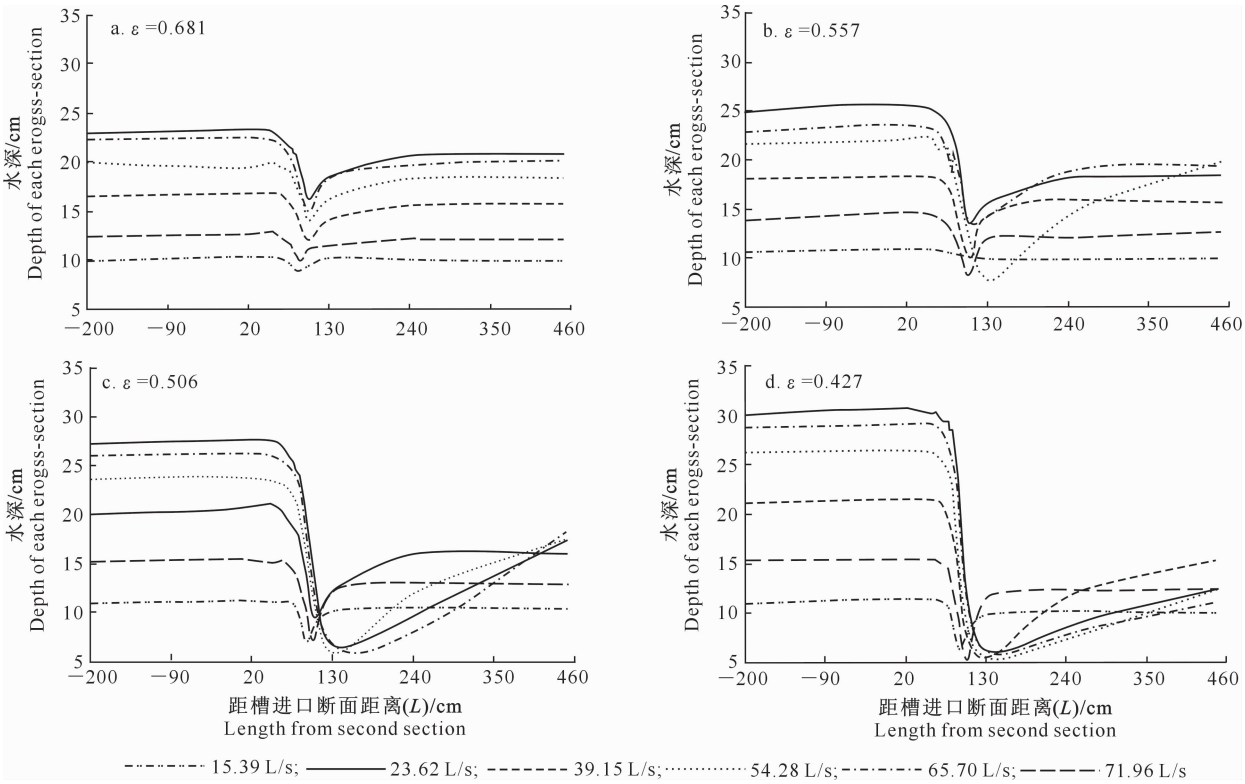

图 3　不同流量时量水槽内不同断面水深的变化

Fig. 3　Variation of water depth in the flume with different throat contraction ratios under different discharges

在自由出流条件下，4 种不同喉口收缩比时量水槽内水面变化情况类似，量水槽进口段水流都比较平顺，在断面 4(距首控制断面 62.6 cm)处水面开始出现缓慢下降直至断面 8(距首控制断面 83.6 cm)处，在量水槽出口段前部分形成中间低两边高的射流，在量水槽出口段后部分形成水跃，水流波动较大，最终慢慢趋于下游水深。

在自由出流条件下，不同喉口收缩比(ε)的量水槽内，水面跌落位置、水面线最低点位置、出现临界水深位置不同。图 3-a 中，ε 为 0.681 时，水面在距喉口下游 3～19 cm 处出现明显下降，在断面 12(距离喉口下游 27 cm)处达到最小水深，水流由缓流状态变至急流状态，在其过渡段产生临界流；从图 3-b～d 可以看出，ε 为 0.427～0.557 时，水面线喉口下游均出现明显下降，但水面降落的范围和最小水深出现位置随收缩比和流量的减小逐渐向下游发展；ε 为 0.557 时，流量大于 65 L/s 时水面在距喉口下游 3～50 cm 处有明显下降，在断面 13(距离喉口下游 51 cm)处水深为最小水深，在其余流量工况下水面在距喉口下游 3～21 cm 处有明显下降，水面线最低点位于断面 12(距离喉口下游 27 cm)附近。

对比 4 种不同喉口收缩比条件下的水面线，可以发现随着喉口收缩比的增大，水面线最低点距喉口断面距离越近。同一喉口收缩比条件下，随着流量的增

大,水面线最低点逐渐向下游发展,距喉口断面距离越远,且量水槽扩散段后半部分水流越不稳定。

2.2 测流控制断面的确定

在梯形渠道适当位置修建梯形喉口量水槽,量水槽上游入口段水流为缓流,当水流通过喉口时形成局部收缩,过流断面形成较大的水面降落,水流流速增大,在喉口附近产生临界流,随后进入急流状态,与下游衔接。由于临界流断面水深与流量可形成稳定单一的关系,对于梯形喉口量水槽的基本流量公式,可以用能量方程及临界流原理加以推导[11-14]。

梯形断面明渠中,如果不计摩阻等能量损失,根据上游断面与临界流断面能量守恒,有[9]:

$$E=h_1+\frac{\alpha Q^2}{2gA_1^2}=h_k+\frac{\alpha Q^2}{2gA_k^2}。\tag{2}$$

式中:E 为水流断面比能,m;h_1 为上游水深,m;A_1 为上游进口段断面面积,m^2;h_k 为临界流段断面水深,m;A_k 为临界流段断面面积,m^2;α 为动能修正系数,取1.0;g 为重力加速度,m/s^2;Q 为流量,m^3/s。

由式(2)得:

$$\frac{dE_s}{dh_k}=\frac{d(h_k+\frac{\alpha Q^2}{2gA_k^2})}{dh_k}=1-\frac{\alpha Q^2}{gA_k^3}(\frac{dA_k}{dh_k})。\tag{3}$$

式中:E_s 为上游测流断面比能,m。

根据临界流断面比能具有最小值,即

$$\frac{dE_s}{dh_k}=0。\tag{4}$$

则

$$\frac{\alpha Q^2}{gA_k^3}(\frac{dA_k}{dh_k})=1。\tag{5}$$

从而得到流量的计算公式为:

$$Q=\sqrt{gA_k^3/(\frac{dA_k}{dh_k})}。\tag{6}$$

梯形断面临界流断面面积 $A_k=(b+mh_k)h_k$。

式中:b 为梯形断面底宽,m;m 为梯形断面边坡。所以流量可采用下式计算:

$$Q=kh_1^a。\tag{7}$$

从图3可以看出,收缩比不同或流量不同时临界流的位置不同,以临界流断面为水位测量断面很难实施。为了实际应用中方便设置水位测量断面,需要在各测流断面中确定出与流量关系相关性好且水位稳定的断面,作为流量计算的控制断面。图4给出了不同喉口收缩比条件下喉口上游4个测流断面(断面1、3、5、7)的水深与实测流量的关系。

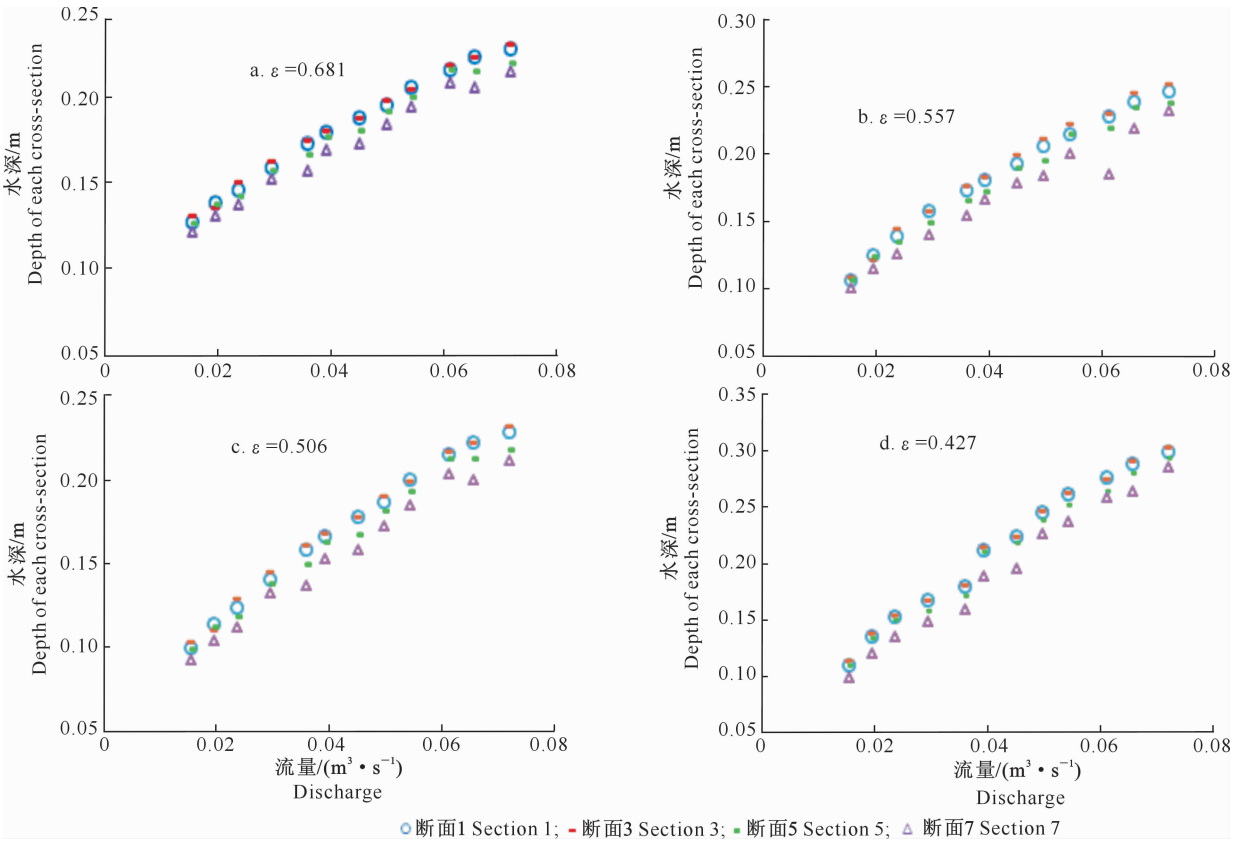

图4 不同喉口收缩比上游控制断面水深与流量的关系

Fig. 4 Relationship between depth of control section and discharge

从图 4 可以看出，断面 3（距量水槽进口断面 52.6 cm 处）水深与流量关系最为稳定，复相关系数高达 0.998 6，且在不同流量下各量水槽断面 3 的水面流动比较平稳，因此可以以断面 3 的水深 h 作为参考水深。

2.3　测流断面水深与流量的关系

根据上述分析，以断面 3 作为流量计算的水深测量断面，图 5 给出了不同喉口收缩比时断面 3 水深与流量的关系。

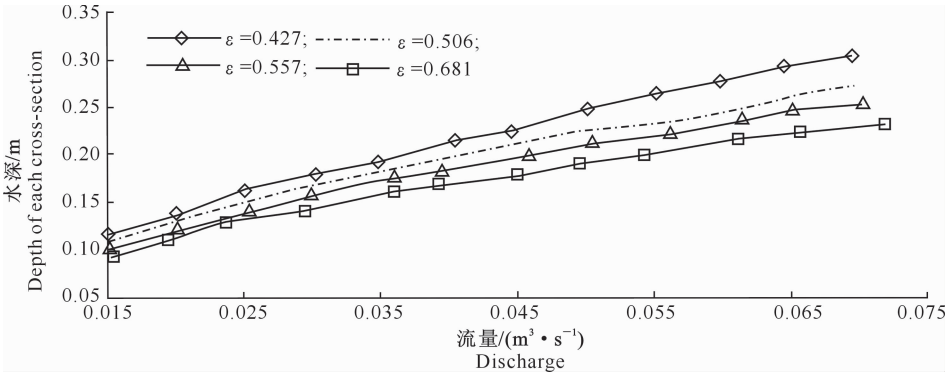

图 5　不同喉口收缩比时控制断面 3 水深与流量的关系

Fig. 5　Relationship between water depth and discharge under different throat contraction ratios

断面 3 水深与流量之间呈良好的指数相关关系。通过回归分析得到流量与喉口收缩比、控制断面 3 的水深（h）之间的关系式为：

$$Q=1.084\varepsilon^{0.891}h^{1.645},R^2=0.998。\qquad(8)$$

式中：h 为控制断面 3 水深，m；ε 为喉口收缩比。

运用公式（8）计算各个工况下的流量，比较计算流量与实测流量，结果见表 3。

表 3　不同喉口收缩比时计算流量与实测流量对比

Table 3　Comparison of calculated and measured discharge under different throat contraction ratios

喉口收缩比（ε）Throat contraction ratio	实测流量/（m³ · s⁻¹）Measured discharge	计算流量/（m³ · s⁻¹）Calculated discharge	相对误差/% Relative error	喉口收缩比（ε）Throat contraction ratio	实测流量/（m³ · s⁻¹）Measured discharge	计算流量/（m³ · s⁻¹）Calculated discharge	相对误差/% Relative error
0.681	0.015 39	0.015 06	2.175	0.557	0.015 12	0.014 77	2.338
	0.019 44	0.019 72	−1.431		0.020 08	0.020 13	−0.260
	0.022 36	0.022 51	9.148		0.025 34	0.025 35	−0.037
	0.029 39	0.030 23	−2.858		0.029 90	0.030 77	−2.906
	0.035 91	0.037 31	−3.912		0.035 99	0.036 94	−2.630
	0.039 15	0.040 17	−2.609		0.039 47	0.039 24	0.577
	0.045 00	0.044 07	2.066		0.045 86	0.045 28	1.262
	0.049 59	0.049 73	−0.280		0.050 52	0.049 89	1.240
	0.054 28	0.053 43	1.570		0.056 25	0.054 12	3.791
	0.061 15	0.061 58	−0.696		0.061 42	0.059 80	2.633
	0.065 70	0.064 53	1.788		0.065 19	0.064 12	1.648
	0.071 96	0.069 08	4.003		0.070 23	0.066 97	4.643
0.506	0.015 12	0.015 00	−2.117	0.427	0.015 00	0.014 66	3.037
	0.020 08	0.021 00	−2.849		0.020 00	0.019 42	3.431
	0.025 34	0.026 00	−3.888		0.025 00	0.025 46	−1.590
	0.029 90	0.031 00	−4.227		0.030 00	0.029 69	1.607
	0.035 99	0.037 00	−2.815		0.035 00	0.033 55	3.601
	0.039 47	0.040 00	−2.590		0.040 00	0.040 39	0.248
	0.045 86	0.047 00	−2.139		0.045 00	0.043 56	2.367
	0.050 52	0.052 00	−2.672		0.050 00	0.051 00	−1.701
	0.056 25	0.054 00	4.097		0.055 00	0.056 72	−2.810
	0.061 42	0.059 00	4.171		0.060 00	0.061 14	−1.978
	0.065 19	0.065 00	0.797		0.065 00	0.066 96	−3.763
	0.070 23	0.070 00	−0.001		0.069 00	0.071 39	−2.827

表3结果表明:喉口收缩比为0.681时,实测流量与计算流量间的最大相对误差为9.148%,平均相对误差为4.435%,最小相对误差为-0.280%。喉口收缩比在0.427~0.557时,小流量时测流误差也比较小,实测流量与计算流量之间最大相对误差为4.643%,平均相对误差为2.08%,最小相对误差为-0.01%,均满足测流误差小于5%,满足灌区量水的精度要求。

2.4 临界淹没度

梯形喉口量水槽的临界淹没度定义为,在相同流量下,下游水位刚开始影响上游水位时对应的下游水深与上游水深的比值[15]。本试验对梯形喉口量水槽的淹没度进行实测,在同一流量下通过调节渠道尾门测得不同的下游水深。通过试验数据分析得到不同流量时的临界淹没度如图6所示。由图6可知,在流量为15~70 L/s时,梯形喉口量水槽的临界淹没度变化范围为0.85~0.93,该研究表明,梯形喉口量水槽有较大的自由出流范围,不易发生淹没出流。对于同一喉口收缩比时,该量水槽的临界淹没度随流量的增大而减小;对于相同流量下,该量水槽的临界淹没度随喉口收缩比的减小而增大,但变化均不明显。

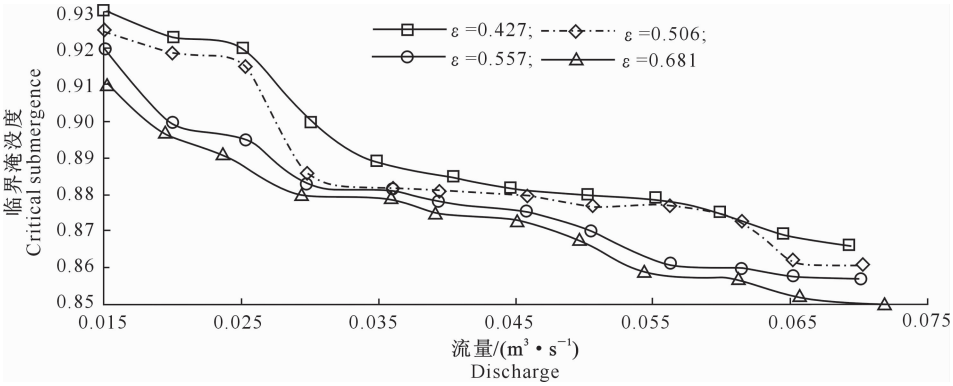

图6 不同流量时量水槽临界淹没度的变化

Fig. 6 Variation of the critical submergence under different discharges

2.5 水头损失

水流在通过梯形喉口量水槽时,由于过水断面形状和大小发生变化,流线弯曲,水流掺混加剧,会产生水头损失。运用$Z+P/\gamma+v^2/2g$(其中Z为位置水头,P/γ为压强水头,v为断面平均流速,g为重力加速度),计算上游首控制断面和下游末控制断面总水头之差即为梯形喉口量水槽水头损失[16]。图7为不同流量下不同喉口收缩比量水槽的水头损失占上游总水头比例的变化情况。由图7可以看出,在同一流量下,随着喉口收缩比的减小,水头损失占上游总水头比例增大。同一喉口收缩比下,随着流量的增大,水头损失占上游总水头比例增大。当喉口收缩比为0.506~0.681时,梯形喉口量水槽的水头损失最小为上游总水头的0.68%左右,最大为上游总水头的12%左右。长喉道量水槽的水头损失[17-18]为上游总水头的13%,因此该量水槽在适宜收缩比下与长喉道量水槽相比水头损失较小,梯形喉口有效改善了水头损失,可以满足要求水头损失小的灌区量水。

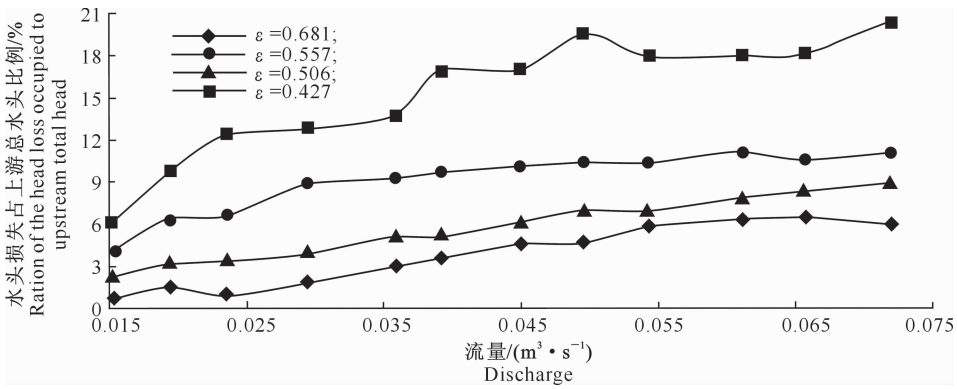

图7 不同喉口收缩比ε和流量Q下梯形喉口量水槽的水头损失占上游总水头比例

Fig. 7 Ratios of the head loss to upstream total head under different contractions and discharge rates

3　结论与讨论

本研究设计了一种喉口断面为梯形的量水槽，在试验测流流量为 15～72 L/s 的 12 种工况下，对梯形渠道 4 种不同喉口收缩比的梯形喉口量水槽进行了 48 组自由出流试验，分析了梯形喉口量水槽的水深变化规律，建立了测流断面水深与流量的关系，确定了适宜喉口收缩比。主要结论如下：

1)探讨了 4 种喉口倾角的测流效果，初步得出了量水槽适宜喉口收缩比为 0.506～0.557。

2)自由出流条件下，各种工况下的上游关键断面水深与流量具有很好的指数相关关系，用上游关键断面水深代替临界水深更方便测量且数据更稳定，基于上游水深建立的流量公式简单实用，测流误差均小于 5%，故该研究所建立的自由出流条件下梯形喉口量水槽的流量公式满足渠道测流要求，而且简单实用。

3)梯形喉口量水槽的临界淹没度变化范围为 0.85～0.93，表明梯形喉口量水槽不易出现淹没出流，自由出流范围较大。

4)梯形喉口量水槽的最小水头损失占上游总水头的 0.68%，平均水头损失占上游总水头的 4%，最大水头损失占上游总水头的 12%，较矩形喉口量水槽上游壅水高度和大流量时的水头损失明显减小。

梯形喉口量水槽结构简单、经济实用，量水观测方便，相比于矩形喉口无喉道量水槽更省工省料。喉口断面由矩形转化为梯形有效增大了自由出流范围，也改善了小流量时测流误差大的缺点。但梯形喉口倾角大小又会影响其测流效果，本研究初步探讨了其适宜体型参数范围。梯形喉口量水槽测流范围大，流量覆盖范围基本能够满足灌区末级渠道灌溉要求，可以在灌区推广应用。由于梯形喉口无喉道量水槽尚无相关研究报道，本研究仅对其水力性能进行了初步探讨，发现该体型量水槽有一定优点，为梯形渠道量水槽提出了新思路，关于梯形喉口量水槽的其他水力特性及量水槽适宜体型参数范围还有待进一步研究。

[参考文献]

[1] 刘　英. U 形渠道圆头量水柱水力性能及标准化研究 [D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2015.
Liu Y. Research on hydraulic performance and standardization of water-measuring column with round head in U-shaped channel [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.

[2] 吉庆丰，沈　波，李国安. 灌区量水设施研究开发进展 [J]. 灌溉排水，2001(4)：69-72.
Ji Q F, Shen B, Li G A. A review on development of measuring water devices [J]. Irrigation and Drainage, 2001(4): 69-72.

[3] 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.
Cai Y, Li T C. Analysis of flow-measuring facilities of irrigation district [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(2): 13-15.

[4] 洪　成，吕宏兴，张宽地，等. U 形渠道机翼形量水槽试验研究 [J]. 灌溉排水学报，2005(1)：63-65.
Hong C, Lü H X, Zhang K D, et al. Experimental research on wing shape measuring flume on U shaped channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005(1): 63-65.

[5] 肖苡钶，王文娥，胡笑涛. 田间便携式平底短喉道量水槽水力特性试验 [J]. 农业工程学报，2015，31(10)：99-106.
Xiao Y Z, Wang W E, Hu X T. Hydraulic performance experiment of portable short-throat flume with fat base in field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 99-106.

[6] 尹京川，马孝义，胡杰华，等. 矩形无喉段量水槽水力特性数值模拟研究 [J]. 中国农村水利水电，2011(6)：98-100.
Yin J C, Ma X Y, Hu J H, et al. Numerical simulation research on hydraulic characteristics of rectangular throat less measuring flume [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(6): 98-100.

[7] 杨珮珮，马孝义，钟新铭. 弧底梯形渠道无喉道量水槽水力性能影响因素研究 [J]. 中国农村水利水电，2016(3)：74-79.
Yang P P, Ma X Y, Zhong X M. The influencing factors of hydraulic performance of arc-based trapezoidal canals and cut-throat flow measurement flume [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(3): 74-79.

[8] 潘志宝，吕宏兴，魏　溪. 灌区量水槽的应用研究现状与进展 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2007(4)：213-217.
Pan Z B, Lü H X, Wei X. Current applied research and advances of measuring flume in irrigation district [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007(4): 213-217.

[9] 王　智，朱风书，刘晓明. 平底抛物线形无喉段量水槽试验研究 [J]. 水利学报，1994(7)：12-23.
Wang Z, Zhu F S, Liu X M. Experimental study on flat parabolic throat less flume for flow measurement [J]. Journal of Hydraulic, 1994(7): 12-23.

[10] 苏华英. 灌区量水槽试验与数值模拟研究 [D]. 成都：四川大学，2006.
Su H Y. Experiment and numerical simulation of measuring flume of irrigation area [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.

[11] 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(7)：57-63.
Liu Y, Wang W E, Hu X T. Effect of bottom slope of U-shaped channel measurement with round head pier [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015(7): 57-63.

[12] 王莹莹,王文娥,胡笑涛,等.矩形渠道薄壁侧堰水力特性试验及数值模拟[J].水力发电学报,2016(1):70-78.
Wang Y Y,Wang W E,Hu X T,et al. Experimental and numerical studies on hydraulic characteristics of sharp-crested side weirs in rectangular channels [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2016(1):70-78.

[13] 肖苡钠,王文娥,胡笑涛,等.田间简易平底短喉道量水槽水力性能初探[J].水力发电学报,2015(10):88-95.
Xiao Y Z,Wang W E,Hu X T,et al. Experiment on hydraulic performance of short-throat flume with flat base for field flow measurements [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015(10):88-95.

[14] 王莹莹,王文娥,胡笑涛,等.小型渠道梯形薄壁侧堰水力特性试验[J].农业工程学报,2016,32(18):111-117.
Wang Y Y,Wang W E,Hu X T,et al. Experiment on hydraulic characteristics of trapezoidal side weir for small channels [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(18):111-117.

[15] 刘 英,王文娥,胡笑涛,等.U形渠道圆头量水柱水力性能影响因素研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(2):228-234.
Liu Y,Wang W E,Hu X T,et al. Factors affecting hydraulic performance of water measuring pillar with round head in U shaped channel [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2015,43(2):228-234.

[16] 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 Y,Wang W E,Hu X T,et al. Experiment and simulation of factors affecting flow measurement of water-measuring column with round head in U-shaped channel [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(19):97-106.

[17] 李 杰.巴歇尔量水槽水力特性试验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
Li J. Study and experiment on hydraulic characteristics of Parshall flume [D]. Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2010.

[18] 李 杰,吕宏兴,胥维纤.巴歇尔量水槽水力特性试验研究[J].节水灌溉,2009(12):45-47.
Li J,Lü H X,Xu W Q. Study and experiment on hydraulic characteristics of Parshall flume [J]. Water Saving Irrigation,2009(12):45-47.

(上接第145页)

[20] 杨 喆,万 山,张乔会,等.大孔树脂纯化山杏核壳总黄酮的工艺优化[J].食品科学,2015,36(10):38-42.
Yang Z,Wan S,Zhang Q H,et al. Process optimization and purification of total flavonoids from apricot shell by macroporous resin [J]. Food Science,2015,36(10):38-42.

[21] 贺金娜,曹 栋,史苏佳.大孔树脂纯化苹果多酚的工艺优化[J].生产与科研经验,2014,40(5):135-141.
He J N,Cao D,Shi S J. Process optimization of macroporous resin for purification of apple polyphenols [J]. Experience in Production and Scientific Research,2014,40(5):135-141.

[22] 何隽婷,梁 勇,梁 斯,等.酱油渣中大豆异黄酮的动态逆流提取及分离纯化研究[J].华南师范大学学报(自然科学版),2010,11(4):80-86.
He J T,Liang Y,Liang S,et al. Study on dynamic countercurrent extraction and separation and purification of soybean isoflavone from soy sauce residue [J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition),2010,11(4):80-86.

[23] 汪海波,刘大川,佘珠花,等.大豆异黄酮类物质的提取、抗氧化性及稳定性研究[J].食品科学,2004,25(1):111-114.
Wang H B,Liu D C,She Z H,et al. Extraction,antioxidation and stability of soybean isoflavones [J]. Food Science,2004,25(1):111-114.

[24] Sun J,Sun B,Han F,et al. Rapid HPLC method for determination of 12 isoflavone components in soybean seed [J]. Agricultural Sciences in China,2011,10(1):70-77.