

网络出版时间:2015-01-05 08:59

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.02.032

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150105.0859.032.html>

# U 形渠道圆头量水柱水力性能影响因素研究

刘 英<sup>1</sup>, 王文娥<sup>1</sup>, 胡笑涛<sup>1</sup>, 谭晓凡<sup>2</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 普明街道办事处, 四川 绵阳 621000)

**【摘要】**【目的】基于临界流原理, 研究不同因素对 U 形渠道圆头量水柱水力性能的影响, 为其在我国北方灌区的推广应用提供参考。【方法】对 U 形渠道上 6 种喉口收缩比( $\epsilon=0.75, 0.70, 0.63, 0.56, 0.50, 0.44$ )的圆头量水柱在 5 种流量( $Q=0.015, 0.025, 0.035, 0.045, 0.055 \text{ m}^3/\text{s}$ )、4 种渠道比降( $i=1/1\ 000, 1/2\ 000, 1/3\ 000, 1/5\ 000$ )下的测流公式、适宜喉口收缩比、水头损失、临界淹没度、测流精度等水力性能进行试验研究。【结果】圆头量水柱的驻点水深与流量间存在良好的指数相关关系, 相关系数达 0.997。根据试验数据回归分析得到了 4 种渠道比降的流量计算公式, 公式符合量纲和谐原理, 满足了测流精度的要求, 实测流量与计算流量之间最大误差为 6.79%; 圆头量水柱的适宜喉口收缩比为 0.50~0.70 时, 上游壅水高度和水头损失均较小, 且临界淹没度较高, 可达 0.90。【结论】圆头量水柱具有结构简单、抗淤堵等优点, 适合在我国北方多泥沙水源的渠道中应用。

**【关键词】** U 形渠道; 圆头量水柱; 水力性能; 渠道比降; 喉口收缩比

**【中图分类号】** S274.4

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2015)02-0228-07

## Factors affecting hydraulic performance of water-measuring pillar with round head in U-shaped channel

LIU Ying<sup>1</sup>, WANG Wen-e<sup>1</sup>, HU Xiao-tao<sup>1</sup>, TAN Xiao-fan<sup>2</sup>

(1 College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Puming Street Office, Mianyang, Sichuan 621000, China)

**Abstract:** 【Objective】 This paper studied the factors affecting hydraulic performance of water-measuring pillar with round head based on the principle of critical flow to improve its application in irrigation areas of North China. 【Method】 The hydraulic performance on flow measurement formula, proper throat contraction ratio, head loss, critical submergence degree, and flow measurement precision of water-measuring pillar with round head with six contraction ratios ( $\epsilon=0.75, 0.70, 0.63, 0.56, 0.50, \text{ and } 0.44$ ) in U-shaped channel was tested based on five discharge rates ( $Q=0.015, 0.025, 0.035, 0.045, \text{ and } 0.055 \text{ m}^3/\text{s}$ ) and four channel slopes ( $i=1/1\ 000, 1/2\ 000, 1/3\ 000, \text{ and } 1/5\ 000$ ). 【Result】 There existed a good exponential correlation between the stagnation-point depth of the water-measuring pillar with round head and the discharge with coefficient of correlation of 0.997. Discharge formulas of four channel slopes were obtained through the regression analysis of experiment data, the fitted discharge formula which was in line with the dimension concordant principle met the flow measurement accuracy, and the maximum error between the measured discharge and the calculated discharge was 6.79%. When the proper throat contraction ratio was

〔收稿日期〕 2013-10-22

〔基金项目〕 国家自然科学基金项目(51179163, 50909083); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD29B01); 中央高校基本科研业务费专项(QN2011127); 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划项目

〔作者简介〕 刘 英(1989—), 女, 河北衡水人, 在读硕士, 主要从事工程水力学研究。E-mail: lykl2008@126.com

〔通信作者〕 王文娥(1975—), 女, 河南孟县人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉技术、流体机械及排灌设备研究。

E-mail: wangwene@nwsuaf.edu.cn

within 0.50 to 0.70 and the upstream backwater as well as the water head loss was small, it had a high critical submergence degree of up to 0.90. 【Conclusion】 The water-measuring pillar with round head has a simple structure and can resist sludge plugging, which suits the channels with sediment-carried water in North China.

**Key words:** U-shaped channel; water-measuring pillar with round head; hydraulic performance; throat contraction ratios

随着我国水资源的日益短缺和市场经济的发展,灌区量水已成为合理调度灌溉水资源、充分利用水资源、按照经济规律进行水价改革、实现灌区现代化管理的一项基本手段。世界各国的研究人员也一直致力于研究体型简单、精度高且损失小的量水设施。Hager<sup>[1-3]</sup>最早提出将 1 个圆锥体或圆柱筒垂直安装在渠槽中量测过槽流量,并通过试验证明了其可行性。随后,吴高巍等<sup>[4]</sup>在棱柱体渠道上对可移动圆柱体进行了试验研究,推导了流量公式,并应用于实践,且效果良好。Samani 等<sup>[5-7]</sup>在新墨西哥州立大学水力学实验室,于梯形渠道上竖直安装 PVC 圆柱筒,通过试验分析了过槽水力特征,并在田间进行了应用,表明其测流误差较小。何武全等<sup>[8]</sup>采用 9 种不同收缩比的圆柱筒在 U 形渠道上进行试验,得到了自由出流条件下流量计算的经验公式。吉庆丰等<sup>[9]</sup>在 U 形渠道上选择 3 种收缩比对圆柱形量水槽进行了试验,建立了圆柱形量水槽测流的计算公式。现有的研究成果基本只针对于圆柱形量水槽,水头损失较大,或只考虑驻点水深、收

缩比等单一因素的影响,尚有许多问题需要进一步研究,如圆柱形量水槽的体型优化、渠道比降对其测流的影响等。

刘嘉美等<sup>[10]</sup>根据绕流原理,以圆柱体量水槽为基础,在圆柱体背水面增加与柱体相切的 V 形尾翼,将由此得到的圆头量水柱竖直安装,使对称面与渠底中心线重合,通过控制尾翼长度,以有效减小水头损失;该量水柱结构简单,测流精度高,水头损失小,但目前对其水力性能的影响因素还缺乏系统研究。本研究从渠道比降、喉口收缩比、长宽比等方面对 U 形渠道圆头量水柱的水力性能进行分析,以确定其水力性能与各影响因素之间的关系,旨在为该量水设施在北方灌区的应用推广提供参考。

## 1 圆头量水柱试验的设计

### 1.1 试验介绍

试验在陕西杨凌西北农林科技大学北校区水工厅进行,试验系统平面布置见图 1。

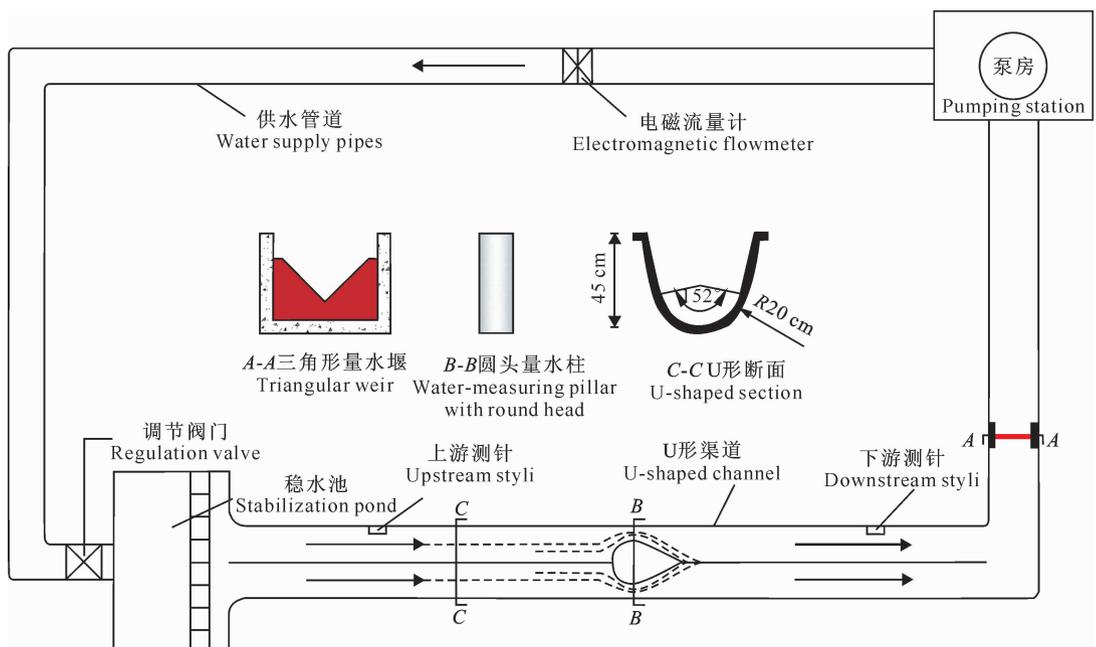


图 1 圆头量水柱试验系统的平面布置

Fig. 1 Plane arrangement for the test system of water-measuring pillar with round head

试验系统主要包括泵房、高位水池、稳水池、调节阀、供水管道、有机玻璃 U 形渠道(渠道比降可调节)、圆头量水柱、尾门、地下回水渠道等。本试验流量范围为  $0.015 \sim 0.055 \text{ m}^3/\text{s}$ , 渠道比降调节范围为  $1/5\ 000 \sim 1/1\ 000$ 。回水渠道段设三角形量水堰, 以量测过槽流量。圆头量水柱上下游各处水位

通过 SCM60 型水位测针测量, 精度为  $0.1 \text{ mm}$ ; 渠道末端设置尾门以控制下游水位高低, 使出流处于自由出流或淹没出流。

试验渠道为有机玻璃 U 形渠道, 渠道综合糙率  $n$  取  $0.011$ 。渠道参数见表 1。

表 1 U 形渠道断面的参数

Table 1 Section parameters of the U-shaped channel

渠道类型 Channel type	渠顶宽/m Width of channel top	渠深/m Channel depth	渠长/m Channel length	底弧直径/m Bottom Arc diameter	中心角/(°) Central angle	外倾角/(°) Camber angle
U	0.53	0.45	12	0.4	152	14

## 1.2 圆头量水柱体型设计

圆头量水柱体型设计的主要设计参数包括柱体直径(即柱体宽度)及 V 型尾翼长度, 高度统一为  $45 \text{ cm}$ 。圆头量水柱体型见图 2, 其中  $D$  为圆头直径,  $L$  为量水柱对称面迎水点(驻点)到尾翼末端的距离。

定义  $L/D$  为圆头量水柱的长宽比。试验采用 6 种不同喉口收缩比(即 6 种不同直径)的量水柱, 以无尾翼的圆柱形量水槽( $L/D=1$ )为参照, 每种收缩比的量水柱采用 2 种不同的长宽比( $L/D=3/2$ ,  $L/D=2$ ), 试验用圆头量水柱基本参数见表 2。

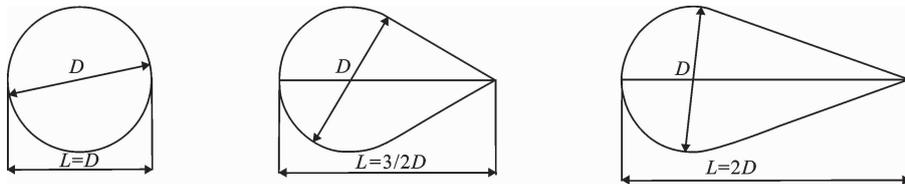


图 2 圆头量水柱的体型设计

Fig. 2 Configuration design of the water-measuring pillar with round head

表 2 圆头量水柱的基本参数

Table 2 Basic parameters of the water-measuring pillar with round head

序号 Number	圆头直径(D)/mm Diameter of round head	喉口收缩比 Throat contraction ratios	柱体长度(L)/mm Length of cylinder		
			$L/D=1$	$L/D=3/2$	$L/D=2$
1	100	0.75	100	150	200
2	120	0.70	120	180	240
3	150	0.63	150	225	300
4	175	0.56	175	262.5	350
5	200	0.50	200	300	400
6	225	0.44	225	337.5	450

## 2 圆头量水柱测流原理

在 U 形渠道轴线适当位置处垂直安装圆头量水柱, 柱前上游渠道中水流为缓流, 当水流通过柱体时在其喉口处形成局部收缩, 因受到侧收缩的影响, 过流断面形成足够的水面降落, 水流流速增加, 并在喉口附近产生临界流, 随后进入急流状态, 与下游水流衔接。因此, 下游水流在相当大的水深范围内不会影响到上游水流。故而, 流量与上游堰顶水头可构成稳定单一的关系。根据能量守恒原理, 即可得到过槽流量。圆头量水柱测流示意图见图 3。

对圆头量水柱的基本流量公式, 可以用能量方

程及临界流原理加以推导。假定槽内流速分布均匀, 则应用能量方程, 上游测流断面比能为:

$$E_s = h_1 + \frac{\alpha Q^2}{2gA_1^2} \quad (1)$$

式中:  $E_s$  为上游测流断面比能,  $m$ ;  $h_1$  为上游水深,  $m$ ;  $\alpha$  为动能修正系数, 取  $1.0$ ;  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $A_1$  为上游断面面积,  $m^2$ 。

在渠道流量、断面形状和尺寸均确定的情况下, 断面比能最小值  $E_{s, \min}$  对应的水深即为临界水深  $h_k$ 。若不计算能量损失, 根据上游断面与临界流断面能量守恒, 有:

$$E_K = E_s = h_k + \frac{\alpha Q^2}{2gA_k^2} \quad (2)$$

式中:  $E_K$  为临界流断面比能,  $m$ ;  $h_K$  为临界水深,  $m$ ;  $A_K$  为临界流断面面积,  $m^2$ , 其余各符号含义同前。

$$\frac{dE_s}{dh_K} = \frac{d}{dh_K} \left( h_K + \frac{\alpha Q^2}{2gA_K^3} \right) = 1 - \frac{\alpha Q^2}{gA_K^3} \left( \frac{dA_K}{dh_K} \right) \quad (3)$$

将(2)式对  $h_K$  求导, 得:

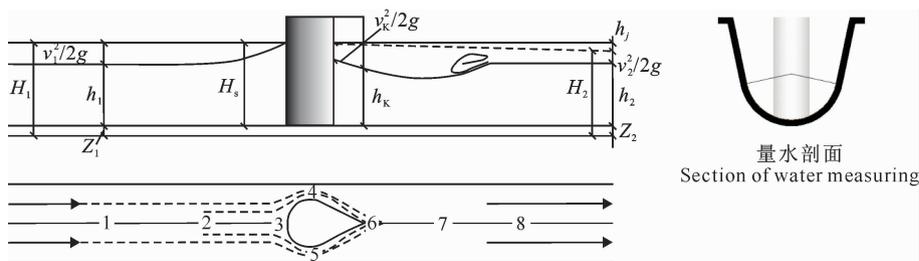


图 3 圆头量水柱测流示意图(1~8 为关键测点)

Fig. 3 Sketch map of flow measurement for the water-measuring pillar with round head(1-8 are the key measuring points)

根据临界流断面比能具有最小值, 即  $\frac{dE_s}{dh_K} = 0$ ,

### 3 结果与分析

由(3)式得:

$$\frac{\alpha Q^2}{gA_K^3} \left( \frac{dA_K}{dh_K} \right) = 1 \quad (4)$$

从而得到流量的计算公式为:

$$Q = \sqrt{\frac{gA_K^3}{\left( \frac{dA_K}{dh_K} \right)}} \quad (5)$$

如图 4 所示, U 形渠道临界流断面面积  $A_K$  的计算公式<sup>[11-12]</sup> 如下:

$$\text{当 } h_K > a \text{ 时, } A_K = \Delta h_K \left( \frac{2r}{\sqrt{1+m^2}} + \Delta h_K m \right) + r^2 \left( \theta - \frac{m}{1+m^2} \right); \quad (6)$$

$$\text{当 } h_K < a \text{ 时, } A_K = r^2 \left( \beta - \frac{1}{2} \sin 2\beta \right). \quad (7)$$

式中:  $h_K$  为临界水深,  $m$ ;  $a$  为底弧弓形高,  $m$ ;  $\Delta h$  为过水断面梯形高,  $m$ ;  $\theta$ 、 $\beta$  分别为  $h_K > a$  与  $h_K < a$  时过水断面底弧圆心角的一半, 取弧度值;  $B$  为水面宽度,  $m$ ;  $m$  为上部切线段边坡系数;  $r$  为圆弧半径,  $m$ 。

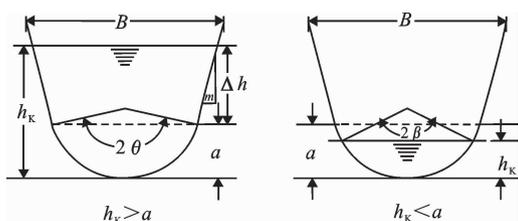


图 4 U 形渠道过水断面面积的计算示意图

Fig. 4 Area calculation of the cross sections of the U-shaped channel

在渠道比降 ( $i$ ) 分别为 1/1 000, 1/2 000, 1/3 000 和 1/5 000, 圆头量水柱的喉口收缩比 ( $\epsilon$ ) 分别为 0.75, 0.70, 0.63, 0.56, 0.50 和 0.44, 流量 ( $Q$ ) 分别为 0.015, 0.025, 0.035, 0.045 和 0.055  $m^3/s$  的条件下, 进行了 120 组试验, 获得了各试验条件下渠道及圆头量水柱 8 个关键点处的水深, 并分析了不同渠道比降条件下渠道流量与圆头量水柱驻点水深、喉口收缩比的关系。

#### 3.1 圆头量水柱驻点水深与流量的关系

不同渠道比降和喉口收缩比时流量与圆头量水柱驻点水深的关系见图 5。从图 5 可以看出, 驻点水深与流量之间呈现良好的指数相关关系, 相关系数达 0.997。同一渠道比降下, 随喉口收缩比的增大, 流量与驻点水深关系曲线上移。由于临界水深的的不稳定性, 因此用驻点水深代替临界水深计算理论流量是可行的。通过对流量与喉口收缩比、驻点水深之间相关关系的分析, 建立了不同渠道比降时具有量纲和谐性的流量计算公式为:

$$Q = 0.3014 \sqrt{2g\epsilon}^{0.47} H_s^{1.95} b^{0.55}, i = 1/1000; \quad (8)$$

$$Q = 0.2868 \sqrt{2g\epsilon}^{0.45} H_s^{1.98} b^{0.52}, i = 1/2000; \quad (9)$$

$$Q = 0.2777 \sqrt{2g\epsilon}^{0.44} H_s^{2.02} b^{0.48}, i = 1/3000; \quad (10)$$

$$Q = 0.2753 \sqrt{2g\epsilon}^{0.46} H_s^{2.07} b^{0.43}, i = 1/5000. \quad (11)$$

式中:  $\epsilon$  为喉口收缩比;  $H_s$  为驻点水深,  $m$ ;  $b$  为喉口断面水面宽度,  $m$ 。

式(8)~(11)是在  $n = 0.011$  的有机玻璃渠道试验基础上推导得出的, 灌区实际渠道的糙率普遍较 0.011 大, 故本试验即将在糙率较大的末级渠道上进行研究, 以对其进行进一步修正。

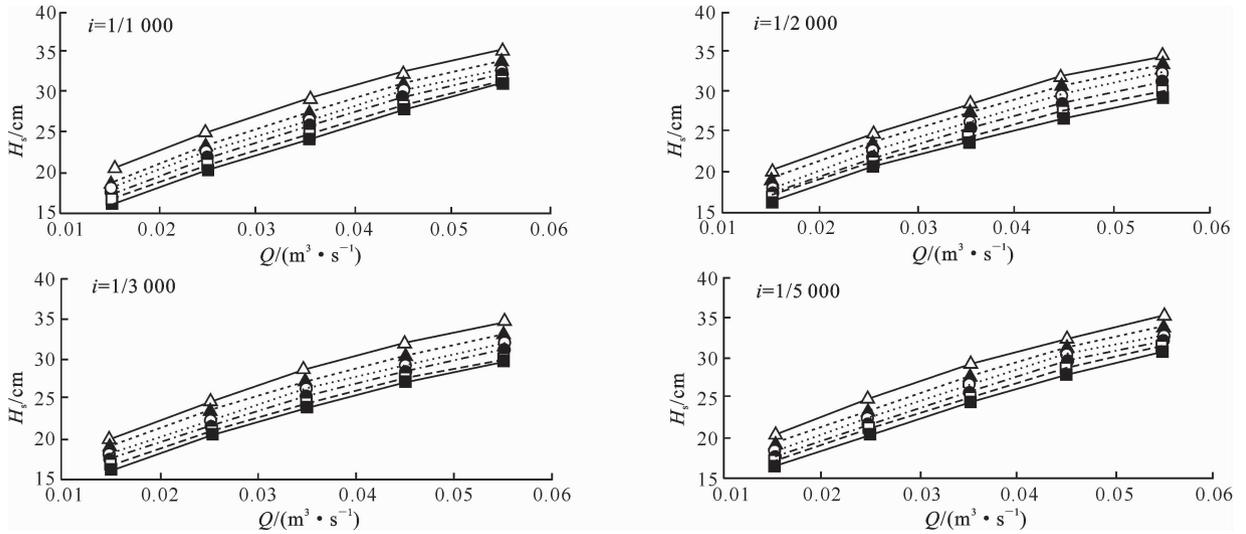


图 5 不同渠道比降( $i$ )及喉口收缩比( $\epsilon$ )下圆头量水柱驻点水深( $H_s$ )与流量( $Q$ )的关系

—■— $\epsilon=0.75$ ; —□— $\epsilon=0.70$ ; —●— $\epsilon=0.63$ ; —○— $\epsilon=0.56$ ; —▲— $\epsilon=0.50$ ; —△— $\epsilon=0.44$

Fig. 5 Relation between  $H_s$  and  $Q$  under different channel slopes ( $i$ ) and throat contraction ratios ( $\epsilon$ )

### 3.2 圆头量水柱喉口收缩比的选择

圆头量水柱喉口收缩比定义为喉口断面面积( $A_c, m^2$ )与渠道衬砌断面面积( $A_0, m^2$ )之比<sup>[13]</sup>,即 $\epsilon=A_c/A_0$ 。喉口收缩比是影响圆头量水柱测流精度的重要参数,如果收缩比过大,喉口处难以形成临

界流;如果收缩比过小,则造成上游壅水高度增大,水头损失增大。因此,只要将喉口收缩比限定在一定范围内,那么因收缩比而导致的测流误差将会限定在某一较小数值范围内。不同试验条件下圆头量水柱上游的壅水高度见表 3。

表 3 不同渠道比降、适宜喉口收缩比及流量下圆头量水柱上游的壅水高度

Table 3 Upstream backwater of the water-measuring pillar with round head under different channel slopes ( $i$ ), proper throat contraction ratios and discharge rates ( $\epsilon$ )

喉口收缩比 Throat contraction ratios	$i=1/1000$		$i=1/2000$		$i=1/3000$	
	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) Discharge	壅水高度/cm Backwater	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) Discharge	壅水高度/cm Backwater	流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) Discharge	壅水高度/cm Backwater
0.70	0.015	0.65	0.015	1.11	0.015	1.08
	0.025	0.86	0.025	0.75	0.025	0.84
	0.035	1.09	0.035	0.89	0.035	0.96
	0.045	1.11	0.045	0.87	0.045	1.13
	0.055	1.26	0.055	1.32	0.055	1.58
0.63	0.015	1.43	0.015	1.34	0.015	1.47
	0.025	1.64	0.025	1.20	0.025	1.40
	0.035	1.96	0.035	2.03	0.035	1.64
	0.045	2.02	0.045	1.82	0.045	1.88
	0.055	2.31	0.055	2.41	0.055	1.91
0.56	0.015	1.88	0.015	1.64	0.015	2.25
	0.025	2.38	0.025	1.61	0.025	2.11
	0.035	2.69	0.035	2.39	0.035	2.39
	0.045	2.83	0.045	2.44	0.045	2.51
	0.055	3.45	0.055	3.21	0.055	2.47
0.50	0.015	2.80	0.015	2.34	0.015	2.70
	0.025	3.55	0.025	2.36	0.025	2.81
	0.035	3.64	0.035	2.92	0.035	3.30
	0.045	3.79	0.045	3.20	0.045	3.37
	0.055	4.72	0.055	3.94	0.055	3.64

当喉口收缩比为 0.50~0.70 时,测流误差较小,且上游壅水高度较小,基本控制在 5 cm 内,满足

灌区对于上下游水头差不高于 5 cm 的要求,因此较适宜的喉口收缩比为 0.50~0.70。鉴于渠道比降为

1/5 000 时上游壅水高度的变化趋势与渠道比降为 1/1 000, 1/2 000 和 1/3 000 时一致, 故表 3 只列出了不同流量和适宜喉口收缩比(0.50~0.70)条件下渠道比降为 1/1 000, 1/2 000 和 1/3 000 时圆头量水柱的上游壅水高度。表 3 表明, 同一流量下, 渠道上游壅水高度随喉口收缩比的增大而减小。

### 3.3 圆头量水柱的临界淹没度

圆头量水柱的临界淹没度定义为不影响上游水位的最大下游水深与上游水深之比<sup>[14]</sup>。其测定方法为: 在相同流量下, 通过调节渠道尾门来改变下游水位, 下游水位在一定范围内不影响上游水位, 随着下游水位的继续升高, 当下游水位开始影响上游水位时, 此时下游水深( $H_2$ )与上游水深( $H_1$ )的比值为临界淹没度, 即  $\sigma = H_2/H_1$ , 较高的临界淹没度可以保证圆头量水柱较大范围的自由出流。对同一喉口收缩比的圆头量水柱而言, 流量不同时临界淹没度也不同, 一般当圆头量水柱满足最大流量下的临界淹没度要求时, 其他流量下的临界淹没度也随之满足。本试验通过对不同渠道比降、喉口收缩比、流量下圆头量水柱临界淹没度的测试, 得出其临界淹没度可达 0.90, 说明该量水柱具有较大的自由出流

范围。

### 3.4 圆头量水柱的水头损失

水流在通过装有圆头量水柱的 U 形渠道时, 由于侧收缩的存在, 速度沿水流方向增加, 由于边界层及水流混掺碰撞的影响产生了局部水头损失, 由摩擦引起的沿程水头损失比由于喉口形状变化所引起的局部水头损失小得多, 因此沿程水头损失可以忽略不计。通过增加尾翼对圆柱形量水槽进行体型优化, 得到的圆头量水柱可以有效地减小水头损失。试验结果表明, 在渠道比降为 1/2 000, 喉口收缩比为 0.63, 流量为  $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$  情况下, 无尾翼( $L/D=1$ )的圆柱形量水槽水头损失为 7.94%, 而  $L/D=3/2$  和  $L/D=2$  的圆头量水柱的水头损失分别为 6.82% 和 6.11%, 可知相同喉口收缩比下有尾翼的圆头量水柱比无尾翼圆柱形量水槽的水头损失要小。图 6 反映了圆头量水柱  $L/D=3/2$  时, 不同渠道比降及喉口收缩比( $\epsilon=0.56, 0.63, 0.70, 0.75$ )下圆头量水柱的水头损失占上游总水头的比例, 由于喉口收缩比过小( $\epsilon=0.50, 0.44$ )时下游水头损失较大, 故本研究不考虑, 相应数据在图 6 中未列出。

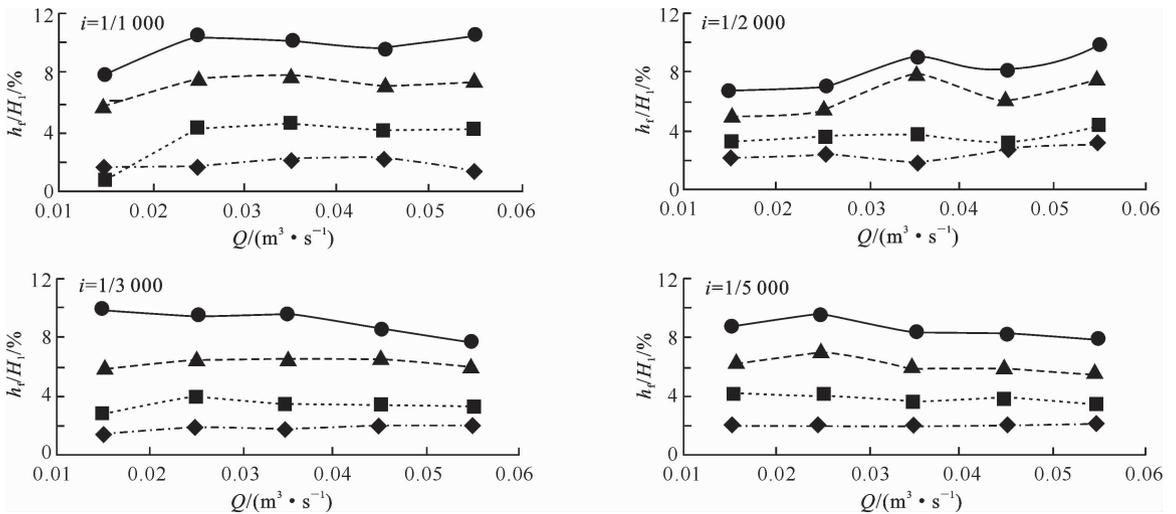


图 6 不同渠道比降( $i$ )、喉口收缩比( $\epsilon$ )和流量( $Q$ )下圆头量水柱的水头损失( $h_f$ )占上游总水头( $H_1$ )的比例  
 ---◆--- $\epsilon=0.75$ ; ---■--- $\epsilon=0.70$ ; ---▲--- $\epsilon=0.63$ ; ---●--- $\epsilon=0.56$

Fig. 6 Ratio of the head loss ( $h_f$ ) occupied in upstream total head ( $H_1$ ) to the water-measuring pillar with round head under different channel slopes ( $i$ ), throat contraction ratios ( $\epsilon$ ), and discharge rates ( $Q$ )

从图 6 可以看出, 当喉口收缩比为 0.56~0.75 时, 圆头量水柱的水头损失  $h_f$  最小为上游总水头  $H_1$  的 1.5% 左右, 水头损失最大为上游总水头的 9.5% 左右。文献<sup>[15]</sup>中长喉道量水槽水头损失约为 13%, 与之相比圆头量水柱的水头损失较小。

### 3.5 圆头量水柱的测流精度

测流精度一般用测流相对误差表示, 相对误差为计算流量值与实际流量值之差与实际流量值的百分比<sup>[16]</sup>。根据 3.1 节中拟合的公式(8)、(9)、(10)、(11)计算过槽流量, 结果表明, 计算流量与实际流量之间的最大误差为 6.79%, 平均误差仅为 0.32%。

在一定喉口收缩比范围内,测流误差均小于 5%。如当渠道比降为 1/1 000、收缩比为 0.50~0.70 时,测流误差最大为 4.70%,最小为 0.29%。

## 4 结论与讨论

本研究通过对 U 形渠道 4 种渠道比降、6 种喉口收缩比的圆头量水柱进行试验,分析了喉口收缩比、渠道比降等渠道结构参数与圆头量水柱水力性能的关系。在试验测流流量为 0.015~0.055 m<sup>3</sup>/s 条件下,建立了基于驻点水深的流量公式,该公式简单实用,测流误差最大为 6.79%;选择的适宜喉口收缩比为 0.50~0.70,具体选择时应视渠道比降大小而定,比降较小的渠道应选取较大的喉口收缩比;比降较大的渠道应选取较小的喉口收缩比。这与张鲁婧等<sup>[17]</sup>关于矩形渠道半圆柱形量水槽的研究成果一致。

渠道过流能力取决于过水断面的形状、尺寸、比降及糙率,量水设施的结构应根据实际情况加以变化,并与渠道条件相配合,对于不同比降、渠道尺寸适宜的圆头量水柱体型及流量公式尚需进一步试验,以便于该量水设施的推广应用。

### [参考文献]

- [1] Hager W H. Modified venture channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1985, 111(1): 19-35.
- [2] Hager W H. Modified trapezoidal venture channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1986, 112(3): 225-241.
- [3] Hager W H. Mobile flume for circular channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1988, 114(3): 520-534.
- [4] 吴高巍,周子奎. 柱形量水槽的研制及应用 [J]. 灌溉排水, 1991, 10(3): 46-51.  
Wu G W, Zhou Z K. Development and application of cylindrical flume [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1991, 10(3): 46-51. (in Chinese)
- [5] Samani Z, Magallanez H. Measuring water in trapezoidal canals [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(1): 181-186.
- [6] Samani Z, Magallamez H. Simple flume for flow measurement in open channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(2): 127-129.
- [7] Samani Z, Magallanez H. Simple measuring-flume in trapezoidal channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(1): 127-129.
- [8] 何武全,王玉宝,蔡明科. U 形渠道圆柱体量水槽研究 [J]. 水利学报, 2006, 5(5): 573-577.  
He W Q, Wang Y B, Cai M K. Cylinder flow measuring flume for U-shape channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 5(5): 573-577. (in Chinese)
- [9] 吉庆丰,何钟宁,龚懿,等. U 形渠道圆柱形量水槽试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6): 30-32.  
Ji Q F, He Z N, Gong Y, et al. Experimental research on cylinder measuring flume in U-shape channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(6): 30-32. (in Chinese)
- [10] 刘嘉美,王文娥,胡笑涛,等. 梯形渠道圆柱形(带尾翼)量水槽试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 23-26.  
Liu J M, Wang W E, Hu X T, et al. The study on trapezoidal channel with cylindrical measuring flume [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 23-26. (in Chinese)
- [11] 吕宏兴,裴国霞,杨玲霞. 水力学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.  
Lü H X, Pei G X, Yang L X. Hydraulics [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002. (in Chinese)
- [12] 马孝义,王文娥,吕宏兴,等. U 形渠道量水槽的性能分析与筛选研究 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 44-49.  
Ma X Y, Wang W E, Lü H X, et al. Analysis of U-shaped channel flow measurement flume properties and selection [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 44-49. (in Chinese)
- [13] 胥纤维,吕宏兴,潘志宝. 末级渠道机翼形量水槽标准化试验研究 [J]. 节水灌溉, 2010(1): 39-41.  
Xu X W, Lü H X, Pan Z B. Experimental research of airfoil-shaped measuring flume standardization in last stage channel [J]. Water Saving Irrigation, 2010(1): 39-41. (in Chinese)
- [14] 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.  
Lü H X, Liu H F, Zhu X Q, et al. Experimental research on airfoil-shaped flow flume [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 119-123. (in Chinese)
- [15] 李国佳,牟献友,李金山,等. U 形渠道直壁式量水槽水力特性的研究 [J]. 中国农村水利水电, 2010(5): 124-127.  
Li G J, Mou X Y, Li J S, et al. Research on the hydraulic characteristics of U-shaped channel of straight wall tanks [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(5): 124-127. (in Chinese)
- [16] U 形渠道量水设备试验研究课题组. U 形渠道平底抛物线形量水槽的研究 [M]. 陕西水利, 1990(4): 16-19.  
Test Research Group of U-shaped Channel Measuring Water Equipment. Research on flat parabolic flume of U-shaped channel [M]. Shaanxi Water Conservancy, 1990(4): 16-19. (in Chinese)
- [17] 张鲁婧,吕宏兴,张晓斐. 矩形渠道半圆柱形量水槽试验研究 [J]. 节水灌溉, 2008(11): 46-50.  
Zhang L J, Lü H X, Zhang X F. Experimental research on semicylindrical measuring flume for rectangular canal [J]. Water Saving Irrigation, 2008(11): 46-50. (in Chinese)