

机翼形量水槽的试验研究

吕宏兴¹, 刘焕芳^{1,2}, 朱晓群¹, 潘志宝¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000)

摘要: 渠道量水设施对灌区节水、实现水资源高效可持续利用具有重要意义, 研究具有结构简单、水头损失小、量水精度较高、流量计算公式简明的渠道量水设备, 是灌区迫切需要的灌溉管理应用技术之一。该文提出了一种仿真机翼形状的渠道量水设施, 在 U 形渠道中通过 12 种量水槽收缩比进行了系统的组合试验, 试验结果表明: 该量水槽过流顺畅, 水头损失小, 试验数据资料表现出极好的相关性, 相关系数为 $R^2 = 0.9988$ 。应用量纲分析法建立的流量公式具有量纲和谐性, 拟合的具有指数形式的流量计算公式简明实用, 流量计算平均误差小于 3%, 临界淹没度可达 0.92。

关键词: 渠道量水; U 形渠道; 量水槽; 机翼形

中图分类号: S274.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)09-0119-05

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 Hongxing, Liu Huanfang, Zhu Xiaqun, et al. Experimental research on airfoil-shaped flow flume[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 119-123. (in Chinese with English abstract)

0 引言

渠道量水技术是灌区实行计划用水、节约用水和按方计收水费的关键技术措施。在农业节水灌溉各项技术的推广应用, 灌区量水是一项基础的、关键性的技术, 是灌区管理部门进行正确引水、输水和水量调配的重要手段, 任何一种节水灌溉措施的节水效率和节水作用, 都要通过灌溉水量的计量进行检验^[1-3]。因此, 灌区量水技术是实行节水农业的关键技术之一, 对实现节约用水和计划用水具有十分重要的意义。

U 形渠道是中国首创的渠道断面形式, 该渠道横断面的结构特点是将标准 U 形断面底圆弧以上的直线段改造为外倾形式, 因而具有抗冻、抗折、输水能力强、水力条件优越^[4,5]等特点。近几十年来, U 形渠道在国内外工农业领域的应用越来越普遍, 农业灌溉、工业排污渠道首选 U 形断面。U 形渠道已成为中国灌区斗渠以下渠道断面衬砌的主要形式。随着 U 形渠道的大量应用, 与其相应的渠道量水技术及设备的研究也取得了诸多成果, 如 U 形渠道抛物线形口式量水槽^[6]; U 形渠道直壁式量水槽^[7]; U 形渠道长喉道量水槽^[8]。这些量水槽对解决 U 形渠道量水问题作出了很大贡献, 但应用中也暴露出计算公式复杂、阻水严重等问题, 尤其是这些量水槽尚难适应底坡小于 1/3000 渠道的量水。针对上述问题, 研究水头损失小, 临界淹没度大的新型量水槽是十分必要的。

1 机翼形量水槽的结构与试验方法

收稿日期: 2005-10-12 修订日期: 2006-06-02

基金项目: 国家高技术发展计划(863 计划)节水农业十五重大科技专项(2002AA2Z4131); 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开放基金(10501-141)

作者简介: 吕宏兴(1955-), 男, 陕西陇县人, 教授, 博士生导师, 从事渠道量水技术方面的研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: lvhongxing@tom.com

1.1 量水槽的结构

文丘里(Venturi)于 18 世纪首先观测到水流通过局部收缩的管道时会产生流速的增加和压强的降低, 并研究了流量与压差的关系, 提出了著名的文丘里流量计, 推导出了流量计算公式。这种水流现象不仅在管道中存在, 在渠道的局部收缩段也同样存在, 称为文丘里槽, 水流通过渠道收缩段时形成侧收缩, 喉口断面产生临界流, 下游水位在临界淹没度以下时, 上游具有稳定的水位流量关系。Hager, Samani, Z. and Magallanez. H, 蔡勇, 李同春, 吉庆丰等, 吕宏兴, 余国安等曾在矩形、梯形、标准 U 形渠道中研究了具有曲线形槽壁的内置式和外置式文丘里型量水槽与圆柱形槽^[9-15]。

根据文丘里型量水槽的测流原理, 可设计出各类形状的量水槽, 但关键是槽壁体形的设计与流量公式的建立, 良好的槽壁体形应满足水流通过顺畅、水头损失小、临界淹没度大和测流精度高的条件。机翼形量水槽是在 U 形渠道两侧修筑仿机翼形槽壁(该量水槽已获国家专利授权, 专利号 ZL200420086285.7)。量水槽分无底坎和有底坎两种形式, 由上游水尺和机翼形槽壁构成, 可根据渠道底坡, 选择适当的收缩比, 量水槽结构如图 1 所示。

通过试验, 该量水槽既可修筑于 U 形渠道中, 也可修筑于渠首与闸墩结合处。本文在 D30 和 D60 两种规格 U 形渠道上采用 12 种收缩比的试验, 通过量纲分析, 建立了反映量水槽流量水位过程的函数关系, 拟合了具有量纲和谐形式的流量计算公式, 流量计算平均误差为 3.03%。

1.2 试验装置与方法

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室与水力学实验室进行, 试验 U 形渠道断面为 D30 和 D60 两种规格, 即底弧半径分别为 15 cm 和 30 cm, 渠道底坡水平。机翼形槽壁用水泥砂浆砌筑在 U 形渠两侧(图 1), 槽底分平底坎和无底坎两种, 量水槽上游、下游及喉口断面设水位测针量测水位, 测

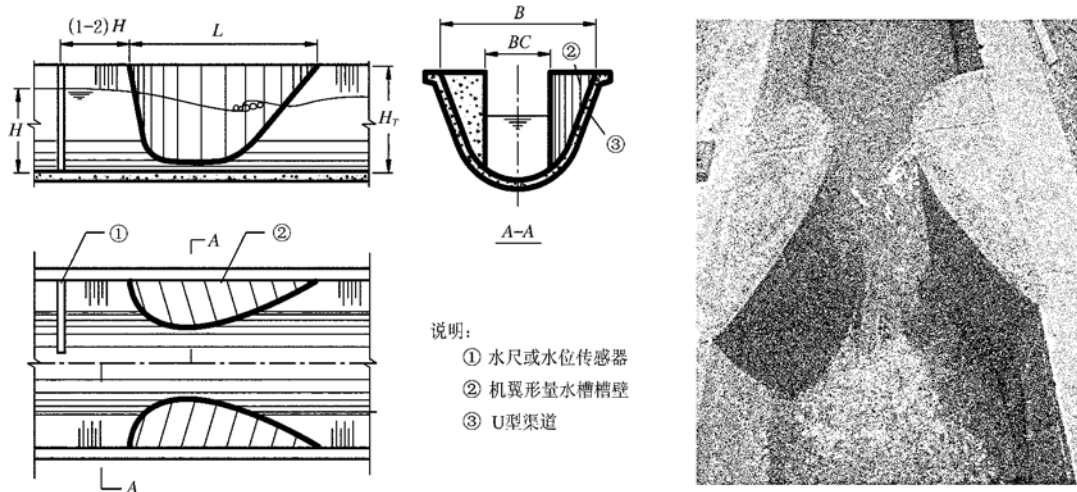


图 1 机翼形量水槽结构图及照片

Fig. 1 Structural diagram and photograph of airfoil-shaped flow flume

量用 90°三角形薄壁堰量测。试验在两种规格 U 形渠道中共选择了 12 种收缩比, 每种收缩比调节不同流量组次量测其对应的上游水深、喉口水深及下游水深, 共量测试验数据 236 组。量水槽淹没度定义为下游水深与上游水深之比, 同一流量在不影响上游水位的前提下, 通过调节下游闸门产生 3~4 个不同的下游水位, 以观测量水槽的临界淹没度, 临界淹没度为不影响上游水位的最大下游水深与上游水深之比。喉口收缩比定义为喉口面积与渠道衬砌断面面积之比, 淹没度及收缩比公式如下

$$\sigma = \frac{h_2}{H} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{A_c}{A} \quad (2)$$

式中 σ ——量水槽淹没度; h_2 ——下游水深, m; H ——上游水深, m; ϵ ——喉口收缩比; A_c ——喉口断面面积, m^2 ; A ——渠道衬砌断面面积, m^2 。

量水槽试验所取收缩比及渠道参数见表 1。

表 1 U 形渠道及量水槽参数表

Table 1 Parameters of U-shaped channel and flow flume

序号	U 形渠道参数			量水槽参数		
	半径 /cm	渠深 /cm	中心角 /($^\circ$)	喉口宽 /cm	收缩比	底坎形式
1				13	0.400	无底坎
2				15	0.444	有底坎
3				15	0.460	无底坎
4	15	40	152	17.4	0.530	无底坎
5				17.4	0.505	有底坎
6				19.4	0.588	无底坎
7				19.4	0.551	有底坎
8				23	0.391	无底坎
9				27	0.456	无底坎
10	30	61	162	30	0.505	无底坎
11				33	0.553	无底坎
12				36	0.600	无底坎

2 流量公式的分析与建立

2.1 流量公式的量纲分析与建立

U 形渠道机翼形量水是根据文丘里原理, 在渠道上选择适当的渠段修筑测流槽, 使之形成收缩段, 水流经过收缩断面时, 产生临界流, 势能减小, 动能增加, 断面比能差值与通过流量存在某种函数关系, 即具有固定的水位流量关系。

根据缓流状态时比能随水深减小而减小, 至临界流断面时比能达到最小值, 假定喉口断面为临界流, 由临界流方程可得出喉口断面临界水深为

$$K_c = \frac{Q^{2/3}}{g^{1/3} B_c^{2/3}} \quad (3)$$

式中 K_c ——喉口处的临界水深, m; B_c ——量水槽喉口宽度, m; g ——重力加速度, m/s^2 ; 该关系式已包含了流量因素。

根据量纲分析的 π 定理, 对试验过程及水流现象各水力要素分析后, 确定影响量水槽水流流量过程的物理量有: 喉口临界水深 K_c 、量水槽上游水深 H 、量水槽喉口宽度 B_c 、重力加速度 g 、液体密度 ρ , 则该水流过程可表示成如下的函数关系

$$F(H, K_c, B_c, g, \rho) = 0 \quad (4)$$

上式共有 5 个物理量, 选择其中的 B_c, g, ρ 为基本物理量, 那么上式可用 2 个无量纲数的关系式来描述

$$F(\pi_1, \pi_2) = 0 \quad (5)$$

2 个无量纲数可由下式确定

$$\pi_1 = \frac{H}{B_c^{x_1} g^{y_1} \rho^{z_1}} \quad (6)$$

$$\pi_2 = \frac{K_c}{B_c^{x_2} g^{y_2} \rho^{z_2}} \quad (7)$$

根据量纲和谐的原则分析, 可得出(6)、(7) 式中的指数分别为: $x_1 = 1, y_1 = 0, z_1 = 0, x_2 = 1, y_2 = 0,$

$z_2 = 0$, 代入(6), (7) 式得

$$\pi_1 = \frac{H}{B_c} \quad (8)$$

$$\pi_2 = \frac{K_c}{B_c} \quad (9)$$

将(3) 式代入(9) 式得

$$\pi_2 = \frac{K_c}{B_c} = \frac{Q^{2/3}}{g^{1/3} B_c^{5/3}} \quad (10)$$

再将(8)、(10) 式代入(5) 式得无量纲组合的函数关系式为

$$F\left[\frac{H}{B_c}, \frac{Q^{2/3}}{g^{1/3} B_c^{5/3}}\right] = 0 \quad (11)$$

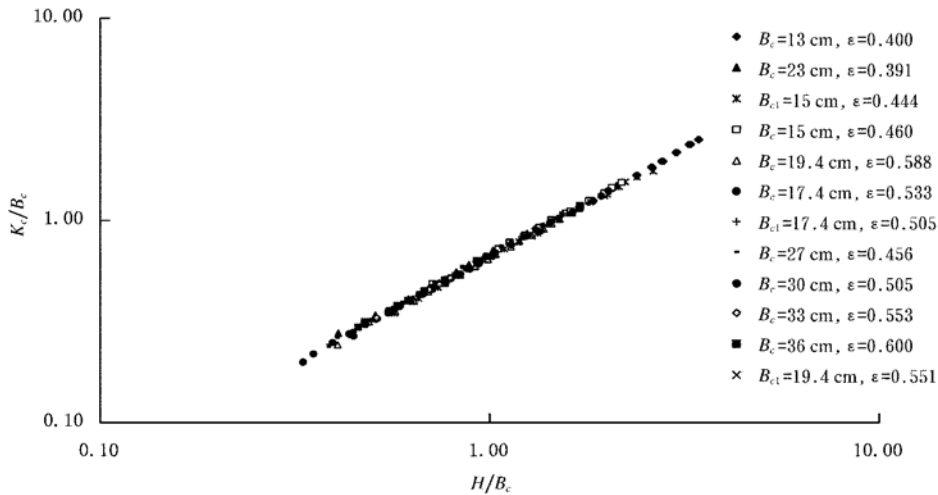


图 2 机翼形量水槽不同收缩比 ϵ 的相对水深 $K_c/B_c \sim H/B_c$ 关系曲线

Fig. 2 Relation curve of relative water depth $K_c/B_c \sim H/B_c$ under different contraction ratios ϵ for airfoil-shaped flow flume

2.2 流量公式中系数 a 与指数 n 的确定

公式(11) 给出了反映包含量水槽流量因素的相对临界水深与量水槽上游相对水深的关系, 为采用无量纲分析试验数据奠定了理论基础。将不同收缩比量水槽量测的所有试验数据用式(11) 中两个无量纲形式组合的量 $\frac{K_c}{B_c} = \frac{Q^{2/3}}{g^{1/3} B_c^{5/3}}$ 与 $\frac{H}{B_c}$ 点绘在双对数坐标中, 试验数据呈线性关系, 见图 2 所示。双对数坐标中的线性关系可表示成如下指数函数式表示

$$\frac{Q^{2/3}}{g^{1/3} B_c^{5/3}} = \alpha \left(\frac{H}{B_c}\right)^n \quad (12)$$

上式还可写成具有量纲和谐形式的显函数流量公式如下

$$Q = a^{\frac{3}{2}} \sqrt{g} B_c^{(2.5-1.5n)} H^{1.5n} \quad (13)$$

其中系数 a 与指数 n 可通过试验数据分析确定。

将本试验在 12 种收缩比的机翼形量水槽中所量测的 236 组数据 $\frac{K_c}{B_c}$ 与 $\frac{H}{B_c}$ 绘于图 2 的双对数坐标中, 所有试验数据均呈现出非常好的相关关系, 且与收缩比无关, 该结果与矩形渠道半圆柱形量水槽类似^[9, 13]。为确定系数 a 与指数 n , 将(12) 式取对数可建立 $\frac{Q^{2/3}}{g^{1/3} B_c^{5/3}} \sim \frac{H}{B_c}$ 如下线性关系式

$$\text{Log}\left[\frac{Q^{2/3}}{g^{1/3} B_c^{5/3}}\right] = n \cdot \text{log}\left[\frac{H}{B_c}\right] + \text{log}(\alpha) \quad (14)$$

试验数据在双对数坐标中拟合得系数 $a = 0.664$, 指数 $n = 1.0605$, 相关系数的平方 $R^2 = 0.9988$ 。代入

(13) 式得 U 形渠道机翼形量水槽流量公式为

$$Q = 0.54156 \sqrt{g} B_c^{0.90925} H^{1.59075} \quad (15)$$

式中 Q ——流量, m^3/s ; g ——重力加速度, m/s^2 ; B_c ——喉口宽度($B_c = B - d$), m ; H ——以量水槽喉口渠底为基准的上游水深, m 。公式(15) 是量纲和谐的, 故流量单位也取决于所取重力加速度 g 、喉口宽度 B_c 及上游水头 H 的单位。

3 结果与分析

3.1 量水槽的测流精度

试验中用直角三角形薄壁堰量测的流量为实测流量, 将分析建立的流量公式(15) 计算所得流量与实测流量比较, 平均误差为 2.58%, 按公式(15) 计算流量与试验实测流量的比较结果见图 3。

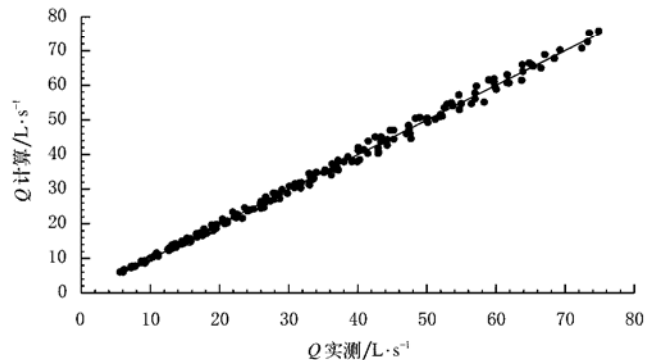


图 3 计算流量与实测流量比较

Fig. 3 Comparison of predicted discharge and measured discharge

3.2 量水槽的临界淹没度

量水槽淹没度定义为下游水深与上游水深之比,试验中对机翼形量水槽的淹没度进行实测,对同一流量调节不同下游水位,水位调节顺序为由小到大,当某一下游水位调高到开始影响上游水位时,该水位对应下游水深与量水槽上游水深之比则为临界淹没度。试验得出该量水槽临界淹没度可达 0.92。

3.3 量水槽上游佛氏数 Fr

为了保证量水槽的测流精度,量水槽上游过水断面的流速水头不应太大,但量水槽同时还应工作在自由流条件下,即量水槽的淹没度应始终小于临界淹没度。因此,量水槽应根据渠道底坡选择适宜的喉口收缩比,底

坡较小的渠道应取较大的收缩比,反之亦然。收缩比的合理选择应使量水槽在测流过程中,上游过水断面流速水头较小。本试验量水槽上游断面的佛氏数 $Fr \leq 0.61$ 。试验对不同收缩比佛氏数 Fr 与流量 Q 关系见图 4,试验表明,同一收缩比 Fr 随流量的增加而减小,且 Fr 与收缩比有关,收缩比愈大, Fr 也较大,这与矩形渠道半圆柱形量水槽 Fr 与流量无关的结果不同^[13],其原因是 U 形渠道的过水断面面积并非水深的线性函数,与矩形渠道断面形状相比,水深较小时,相同水深与水面宽度的上游过水断面面积较小,因而动能也较大,所以 Fr 随流量的增加而减小。

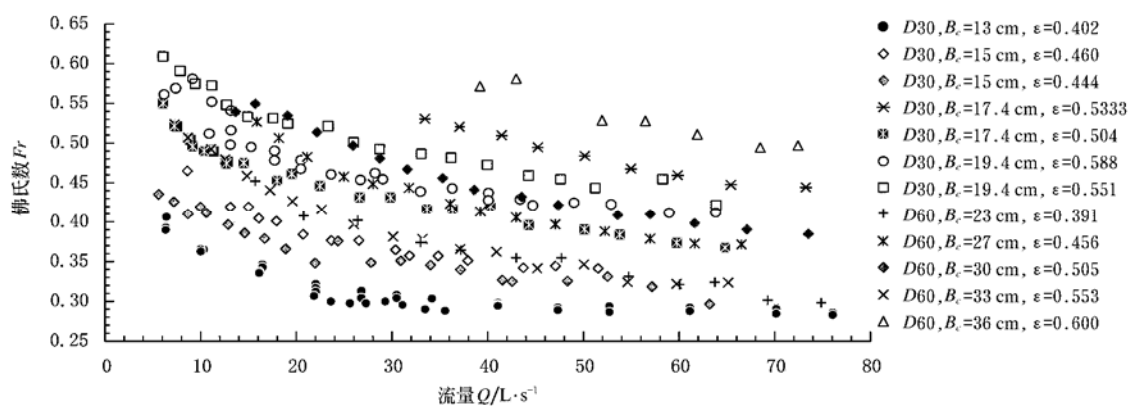


图 4 不同收缩比佛氏数 Fr 与流量 Q 的关系

Fig. 4 Comparison of Froude number Fr and discharges Q under different contraction ratios

4 结论

本文通过在 D30 和 D60 两种规格 U 形渠道上选择 12 种收缩比的机翼形量水槽进行试验研究,取得 236 组试验数据,可总结如下几点:

1) U 形渠道已在中国大量推广应用,与已有的 U 形渠道抛物线形量水槽、直壁式量水槽和长喉道量水槽^[3-6]相比,机翼形量水槽具有水头损失小,渠道阻水小,流量计算公式简捷,临界淹没度高等优点。试验表明,机翼形量水槽是适合 U 形渠道上量测流量的新型量水设备,且量水槽结构简单,施工精度易于控制,因此有较好的推广应用前景。

2) 在适宜收缩比的条件下,量水槽喉口可形成临界流,从而具有稳定的水位流量关系。本文通过量纲分析建立的无量纲式(12)较好地反映了该量水槽不同收缩比时相对临界水深 K_c/B_c 与相对水头 H/B_c 之间的指数函数关系。由此建立的流量公式(15)满足量纲和谐性,同时具有一定的精度,且公式简捷易用,便于向灌区推广应用。

3) 该量水槽具有较高的临界淹没度,本试验临界淹没度达 0.92。

4) 机翼形量水槽设计时要针对不同底坡渠道根据通过的流量与渠道正常水深确定适宜的收缩比。而量水槽适用 U 形渠道底坡的范围作者将在继续深入研究的

基础上另外撰文介绍。

[参考文献]

- [1] 蔡勇,周明耀.灌区量水实用技术指南[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [2] 范家炎,史伏初,郑浩杰.灌区量水设备[M].北京:水利电力出版社,1987.
- [3] 陈泽恩.明渠测流及量水槽精度的鉴定[J].中国农村水利水电,1995,(9):22-25.
- [4] 陕西省水利厅,陕西省质量技术监督局.U形渠道量水槽标准[S].西安,2000.
- [5] 吴景社,朱凤书,康绍忠,等.U形渠道适宜量水设施及标准化研究[J].灌溉排水学报,2004,23(2):38-41.
- [6] 王智,朱凤书,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.
- [7] 张志昌.U形渠道直壁式量水槽研究与应用[J].陕西水利,1992,(1).
- [8] 尚民勇.U形渠道长喉道量水槽的试验研究及其应用[J].陕西水利,1991,(3).
- [9] Hagger W H. Modified venturi channel[J]. J Irrig Drain Eng, 1985, 111(1), 19-35.
- [10] Hagger W H. Venturi flume of minimum space requirements[J]. J Irrig Drain Eng, 1988, 114(2): 226-243.
- [11] Samani Z, Magallanez H. Simple flume for flow measurement in open channel[J]. J Irrig Drain Eng, 2000, 126(2): 127-129.
- [12] Samani Z, Magallanez H. Measuring water in trapezoidal

- channel[J]. *J Irrig Drain Eng*, 1993, 119(1): 181- 186.
- [13] Hagger W H. Modified trapezoidal venturi channel[J]. *J Irrig Drain Eng*, 1986, 112(2): 225- 241.
- [14] 蔡 勇, 李同春, 吉庆丰, 等. 梯形渠道圆柱形量水槽的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2005, (8): 63- 66.
- [15] 吕宏兴, 余国安, 陈俊英, 等. 矩形渠道半圆柱形简易量水槽试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 81- 84.
- [14] 蔡 勇, 李同春, 吉庆丰, 等. 梯形渠道圆柱形量水槽的试

Experimental research on airfoil-shaped flow flume

Lü Hongxing¹, Liu Huanfang^{1,2}, Zhu Xiaoqun¹, Pan Zhibao¹

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, China;*

2. *Water Conservancy and Architectural Engineering College, Shihezi University, Shihezi 832000, China*)

Abstract: Water-gauging facility in canals is of great significance to water saving and efficient and sustainable water utilization in irrigation districts. To research the gauging facility with simple structure, low head-loss, high accuracy, simple and clear discharge formula is one of the irrigation management techniques urgently needed in irrigation districts. A dummy airfoil-shaped water-gauging facility was brought forward. Systematic experiments on the U-shaped canals with 12 different contraction ratios for measuring flumes were conducted. The experiment results show that the flow through the flume is smooth, water head-loss is low and experimental data are closely correlated with the correlation coefficient $R^2 = 0.9988$. The discharge formula established by the method of dimensional analysis is harmonious, and the formula fitted with exponential form is simple, clear and practical, the mean error of discharge calculating results is less than 3%, and critical submergence reaches 0.92.

Key words: canal water gauging; U-shaped canal; flow flume; airfoil-shaped