

平底抛物线形无喉段量水槽试验研究*

王 智 朱凤书 刘晓明

(西北农业大学水利系)

提 要

本文通过三种文丘利槽的初步研究,推荐其中适合曲线形渠道测流的平底抛物线形无喉段量水槽,与传统文丘利槽相比,它具有显著优点:(1)过流能力强,低水位测流精度高;(2)方便泥沙及漂浮物通过;(3)结构简单,呈良好流线形,工程量小;(4)具有较高的临界淹没度($S > 0.85$)和可变的喉口断面收缩比($e = 0.2 - 0.7$)。文中考虑喉口控制断面动水压力分布特征并根据喉口面积收缩比的概念,推导出槽前水深与流量计算公式;通过在U型渠道上的室内外试验和计算机仿真,给出了流量系数的变化规律、测流精度(误差小于 $\pm 3.5\%$)、临界淹没界限及壅水特性。文末给出了设计应用方法。

关键词 平底抛物线,无喉段量水槽,U型渠道,面积收缩比,流量系数,测流幅度。

一、概 述

本世纪40年代以来,随着灌溉工程技术的发展,许多国家采用了U形、半圆形、抛物线形、半椭圆形等曲线架空水槽和地面渠道,这些曲线形断面水力条件优越,技术上更趋合理^[1]。70年代以来,我国采用了U形和抛物线形断面渠道,并根据地面渠道受力特点,将标准U形断面改为直线段可外倾的“U”形断面(以下统称U型),具有结构抗冻、抗折、过流能力强等优点,已成为未来渠道衬砌的主要形式^[1]。但对上述曲线形渠道,尚难发现适宜的量水建筑物。

技术复杂、价格昂贵的超声波流量计、电磁流量计等明显不适合我国灌溉渠道大量使用^[2];水文测验中的流速断面法、示踪法、浓度法等测量精度差、费时多、难以满足灌溉量水要求^[3,6];堰类量水建筑物(如薄壁堰、宽顶堰)一般要求抬高底坎、易造成淤积;孔类量水装置(如孔板、喷嘴等)要求有压出流且孔口较小,易引起非溶解物(如泥沙、浮冰、杂草等)壅积或堵塞^[3-6]。因此,槽类量水建筑物被认为更适合灌溉渠道应用。这类量水装置一般具有水位跌差小、不易淤积、容易建造、测量精度较高等优点^[4,5]。

Parshall(1920)提出了巴歇尔(Parshall)量水槽^[4]、Skogerboe等(1967, 1972)又提

* 本文于1992年3月9日收到。本项研究得到水利部水利技术开发基金和陕西省泾惠渠管理局、陕西省水利水保厅农水处的资助。

出矩形无喉段量水槽^[4]，现已广泛使用于梯形和矩形渠道。但由于其临界淹没度较小(0.6—0.8)，缓坡渠道上多产生淹没出流，测流精度差。上述二槽使用经验水位—流量关系，且水头测量断面的弗汝德数较大，水位波动对测流精度有显著影响^[7]。Khafagi槽、H槽^[4]和矩形、梯形长喉道量水槽^[6]也有应用，但上述槽皆为折线形断面，一般用于折线形渠道，用于曲线形渠道时因过渡段连接不善等原因，误差较大^[8]。ISO推荐的U形长喉道量水槽^[6]仅适用标准U型渠，对U型和其它曲线形断面仍难以适用。

根据量水建筑物不淤积、不壅水、工程量小且坚固耐用的要求，本项研究最初提出三种新型平底无喉段式量水槽，收缩喉口分别为V形、U形和抛物线形，用薄壁板制作，上、下游为混凝土渐变段(1:6)。初步试验表明：抛物线形量水槽具有过流能力强(相同断面积时，其水力半径大于V形和U形)、低水位测流精度高(仅次于顶角为60°的V形)、流量公式理论性强、明确、简单，对保证量水精度有重要意义。其构造呈良好流线形，不仅适合U形渠，而且适合其它曲线形渠道应用。本文就平底抛物线形无喉段量水槽进行了大量试验研究。文中引入可变的面积收缩比概念，给出了这种量水槽在各种自由出流运行工况下的水位流量关系和其他量水特性。

二、自由出流水深与流量关系

(一)喉口断面收缩比和抛物线的形状系数 平底抛物线形无喉段量水槽是一种文丘利型临界水深槽(图1)。水流在槽前为缓流，经进口收缩渐变段时不断加速，在喉口下游附近出现临界水深，后进入急流状态，与下游渠中水流衔接。因此下游水流在相当大的水深范围对上游水流无干扰，过槽流量只与槽前水深和量水槽的几何尺寸有关。

文丘利型量水槽喉口断面相对行进渠断面必须有足够的收缩程度，才能保证槽内出现临界水流状态。巴歇尔量水槽和矩形无喉段量水槽的研究虽然没有明确指出收缩程度的要求，但这两种槽的喉口宽与进口宽的比值皆小于0.77(巴歇尔槽为0.32—0.735，矩形无喉段槽为0.5—0.769)^[4]。Hager^[7]研究矩形输水槽中平底矩形薄壁堰时提出收缩比的概念，据此提出了理论的流量公式和流量系数。对本文曲线形行进渠和喉口断面，唯面积收缩比可表示收缩程度的大小。

如图1，设平底抛物线型无喉段量水槽喉口断面的方程为：

$$y = Px^2, \quad (1)$$

式中：y、x为纵横坐标(m)；P为抛物线的形状系数(m⁻¹)。

设喉口断面高度与行进渠高相同，为H(m)，则喉口断面面积可表示为：

$$A_T = \frac{4}{3} H \sqrt{H/P}. \quad (2)$$

定义：抛物线形无喉段量水槽的面积收缩比为：

$$\varepsilon = A_T / A_0, \quad (3)$$

其中：A₀为行进渠断面面积(m²)。式(2)代入式(3)整理得，喉口抛物线的形状系数为：

$$P = \frac{16H^3}{9\varepsilon^2 A_0^2}, \quad (4)$$

已知行进渠断面面积A₀(m²)、渠深H(m)和量水槽的设计收缩比ε时，可由式(4)求解P，

取得式(1)所示的喉口断面方程。

(二) 自由出流流量公式 建立行进渠水深 $h(m)$ 与过流槽流量 $Q(m^3/s)$ 的关系时, 假定量水槽的几何尺寸 (ε 、 P) 为已知, 同时还假定: (1) 量水槽喉口底部高程与水尺位置的行进渠底保持水平; (2) 行进水流为缓流; (3) 进口收缩渐变段的水头损失忽略不计。

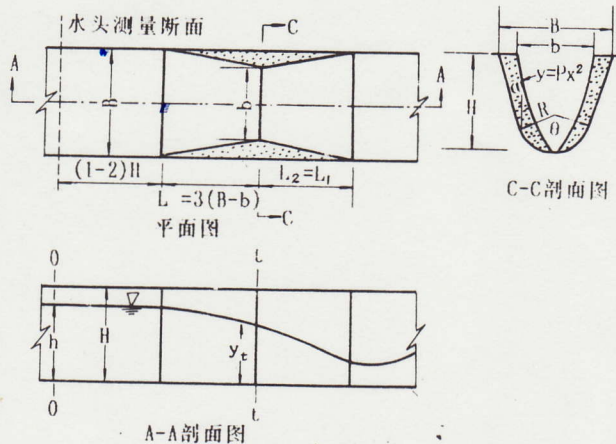


图1 平底抛物线形无喉段量水槽

如图1, 以喉口底部水平面为基准面, 可建立 $O-O$ 断面和 $t-t$ 断面的能量平衡方程:

$$H_0 = \alpha'_t y_t + \frac{\alpha_t Q^2}{2g A_t^2}, \quad (5)$$

式中: H_0 为上游总水头(m); y_t 为喉口过水断面中心水深(m); A_t 为喉口过水断面面积(m^2), 据式(2), A_t 可写为:

$$A_t = \frac{4}{3} y_t \sqrt{y_t / P}, \quad (6)$$

α_t 为喉口断面流速分布不均匀系数. 在收缩渐变段, 水流不断加速, 流速分布接近均匀, 因此可取 $\alpha_t \approx 1$; α'_t 为喉口断面压强分布修正系数. 试验证明, 喉口动水压强分布可近似用水深的线性方程表示(图2):

$$\frac{P}{\gamma} = K_1 y_t, \quad (7)$$

式中: K_1 为动水时压强偏离静水压强的系数. 因此, 喉口断面压强分布修正系数可写为⁽⁷⁾:

$$\alpha'_t = \frac{K_1 + 1}{2}, \quad (8)$$

试验表明, 喉口断面实际水深 y_t 与该抛物线形断面的临界水深 y_c 存在线性关系. 由图3, $K_2 \approx 1.0554$.

$$y_t = K_2 y_c, \quad (9)$$

式中: K_2 为比例常数.

对抛物线喉口, 其临界水深可表示为⁽³⁾

$$y_c = \frac{3}{4} H_0, \quad (10)$$

式(6)、(8)、(9)、(10)代入式(5)整理得

$$Q = \frac{K_2}{4} \sqrt{3K_2 g [8 - 3(K_1 + 1)K_2]} H_0^2 / \sqrt{P}, \quad (11)$$

令: $C_d = \frac{K_2}{4} \sqrt{3K_2 g [8 - 3(K_1 + 1)K_2]}$, (12)

称 C_d 为流量系数, 则式(11)又可写为

$$Q = C_d H_0^2 / \sqrt{P}. \quad (13)$$

上式表明, 过抛物线形量水槽的流量与上游总水头的平方成正比, 与量水槽的几何参数 (P) 紧密相关.

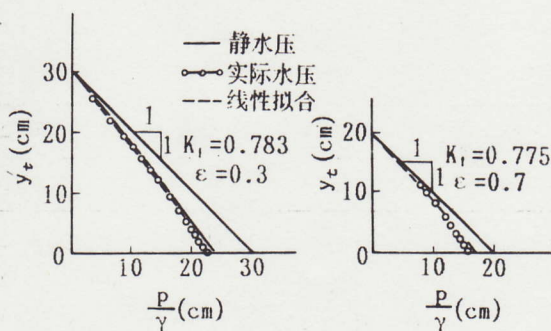


图2 $P/\gamma - y_t$ 关系

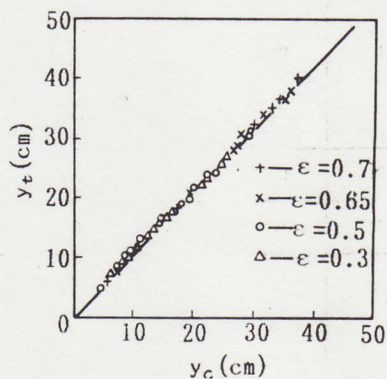


图3 $y_t - y_c$ 关系

实践中仅可实测槽前水深 h , 故, 以 h 代替 H_0 , 加入行进流速修正系数 C_v 可得 Q 与 h 关系:

$$Q = C_d C_v h^2 / \sqrt{P}, \quad (14)$$

因 $H_0 = h + \alpha_0 Q^2 / (2gA^2)$, 则联立式(13)、(14)得:

$$C_v = \left(1 + \frac{\alpha_0 C_d^2 C_v^2 h^3}{2gPA^2} \right)^2, \quad (15)$$

式中: α_0 为行进渠流速分布不均系数, 对顺直行进渠, $\alpha_0 \approx 1$; A 为行进渠中水深为 h (m)时的过水断面面积(m^2). 已知行进渠水深 h 及抛物线形状系数 P 时, 即可由式(15)和式(14)迭代求得流量 Q .

三、试验与模拟

(一)试验装置 试验是在 11 种水平的和有坡的 U 型渠槽中进行的. U 型断面直线段外倾角 $\alpha = 0^\circ - 14^\circ$, 底弧半径 $R = 0.1 - 0.3m$; 量水槽的喉口断面收缩比分别取 $\epsilon = 0.85, 0.783, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.50, 0.40$ 和 0.30 , 共 9 级. 喉口控制断面用

木板或钢板精心制作。安装时，使喉口断面中心线与上游渠道中心线一致，喉口底部与水尺处的渠底相平。喉口上、下游为混凝土进、出口渐变段，长度分别为 $L_1 = \eta_1(B-b)$ 、 $L_2 = \eta_2(B-b)$ ，其中 $\eta_1 = 3$ ， $\eta_2 = 3-6$ 。水尺位于进口渐变段末端上游(3—4) H 距离处。过槽流量采用 90° 标准 V 形薄壁堰测量，水位测量采用针形水位测针 ($\pm 0.1\text{mm}$)。断面流速分布用毕托管、断面压强用测压管测量。试验 U 型渠断面及抛物线形量水槽尺寸如表 1。

表 1 • 被测 U 型渠参数及部分量水槽的回归流量公式

U 型渠断面				量水槽参数		回归公式 $Q = C_d(H_0 + \Delta)^2 / \sqrt{P}$			
编号	R(m)	H(m)	$\alpha(^{\circ})$	ε	P (m^{-1})	$\Delta(\text{mm})$	相关系数 r	误差 δ (%)	C_d
1	0.1	0.3	9.5	0.3	134.49	-7.2	0.99995	0.138	2.588
				0.4	75.65	-7.0	0.9998	0.25	2.348
				0.5	48.42	-6.4	0.999	0.63	2.300
				0.6	33.62	-6.2	0.99997	0.06	2.326
2	0.1	0.3	14	0.65	28.65	-4.7	0.999	0.80	2.217
3	0.15	0.335	0.75	0.65	18.98	-3.5	0.9997	0.40	2.098
4	0.15	0.4	9.5	0.65	18.13	-5.0	0.9995	0.73	2.203
				0.70	15.63	-6.4	0.9983	0.929	2.095
				0.75	13.62	-2.1	0.9998	0.205	2.048
5	0.15	0.32	12.15	0.65	15.67	-3.4	0.9998	0.32	2.047
6	0.15	0.4	14	0.65	16.35	-1.5	0.9999	0.33	2.110
7	0.2	0.5	10.65	0.65	12.90	-7.0	0.9997	0.365	2.132*
8	0.25	0.57	10	0.65	10.02	-8.5	0.9996	0.60	2.208*
9	0.3	0.6	8.8	0.65	7.98	-3.7	0.99995	0.33	2.102
10	0.3	0.6	11.15	0.65	7.73	-2.2	0.9998	0.718	2.004*
11	0.3	0.6	12.7	0.65	7.67	-4.6	0.99995	0.19	2.182

* 为野外现场试验，流量测点距离较远，测量同步性较差。

(二) 试验过程 一旦行进渠和量水槽中出现稳定过流状态，则由上游测压断面(水尺位置)测量上游水深 h ，由喉口断面测量喉口水深 y_t 及压力水头 P/y ，并由标准 V 形薄壁堰测得 Q ，上游断面总水头可计算为 $H_0 = h + Q^2 / (2gA^2)$ ，一些试验中还观测了水面线的变化过程，以便分析不同渐变段长度的影响和水尺的最近位置。

(三) 水力电算模拟 为了确定较大尺寸范围平底抛物线形无喉段量水槽的全面特性，克服标准流量实测困难，进行了水力电算模拟。

水流自槽前缓流状态向喉口附近临界流逼近时，其水面线呈下降趋势。计算机模拟

的控制方程为非棱柱体恒定渐变流水面线方程:

$$\frac{dE}{dx} = S_0 - J, \quad (16)$$

式中: dx 为断面间距微分(m); dE 为断面比能微分(m), $E \approx h + Q^2 / (2gA^2)$; s_0 为底槽比降(m/m); J 为水面坡降(m/m).

$$J = \frac{n^2 Q^2 \chi^{4/3}}{A^{10/3}}, \quad (17)$$

式中: n 为糙率; χ 为湿周(m); A 为过水断面面积(m²). 式(16)的差分形式为:

$$\frac{E_i - E_{i+1} + h_j}{\Delta x} = \pm (\bar{S}_0 - \bar{J}), \quad (18)$$

式中: h_j 为断面 i 、 $i+1$ 间的局部水头损失(m); \bar{S}_0 、 \bar{J} 分别为断面间的平均底面坡降和水面坡降; 等号右边正负号按计算方向选取; 计算方向与水流方向相同时取“+”, 反之取“-”. 由式(18)令:

$$F(h) = \frac{E_i - E_{i+1} + h_j}{\pm (\bar{S}_0 - \bar{J})} - \Delta x. \quad (19)$$

已知 i 断面水深 h_i 时, 据式(19), 求解 $F(h)=0$ 的根, 可得到 $i+1$ 断面水深 h_{i+1} .

由于水流自槽前缓流向喉口附近临界流转化, 宜采用自下而上逆流推算法. 以喉口断面为控制断面, 初始控制水深为喉口水深 y_t , 忽略 h_j , 并认为喉口至水尺位置的渠底为水平时, 式(19)可写为:

$$F(h) = \frac{E_i - E_{i+1}}{\bar{J}} - \Delta x. \quad (20)$$

根据临界流方程, 喉口抛物线形断面的临界水深为:

$$y_c = \left(\frac{27P}{32g} \right)^{1/4} Q^{1/2}. \quad (21)$$

将式(21)代入式(9), 得初始水深

$$h_1 = y_t = 1.0554y_c. \quad (22)$$

代入式(20)逆流推算水面线, 可得给定 Q 条件下的槽前水深 h . 推算过程中采用“二分法”(FORTRAN 程序).

(四) 试验模拟结果与分析

1. 水深与流量关系规律 灌排输水渠槽的比降常变化在 $1/200$ — $1/3000$. 试验(图 4)表明, $\varepsilon > 0.75$ 时, 不同坡度上有不同 Q — h 关系, 难以寻求统一流量公式; $\varepsilon = 0.7$ 时, $1/300$ — $1/700$ 坡降范围, 量水槽具有相同的 Q — h 关系; $\varepsilon = 0.65$ 时, 坡降范围可扩大至 $1/300$ — $1/1000$; $\varepsilon < 0.6$ 时, 最缓坡降可为 $1/3000$. 因此最大的收缩比不宜超过 $\varepsilon = 0.70$.

2. 流量系数 C_d 图 5 表明, $K_1 = (P/\gamma)/y_t$ 随相对水深 $h^* = h/H$ 的增大而减小, 随 ε 无显著差异. K_1 — h/H 关系可表示为:

$$K_1 = 0.921 - 0.224h/H, \quad (23)$$

相关系数 $r = 0.9287$, 平均相对误差 $\delta_{k1} = 2.81\%$.

图 5 还表明, $K_2 = y_t/y_c$ 是一个相对稳定的值, K_2 均值为:

$$K_2 = 1.0554, \quad (24)$$

相对误差 $\delta_{k2} = \sigma_{n-1} / 1.0554 = 1.76\%$.

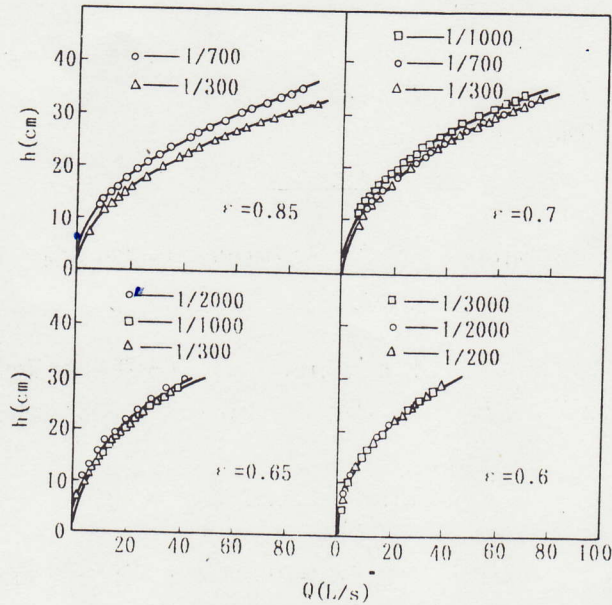


图4 不同坡度上的 $Q-h$ 关系

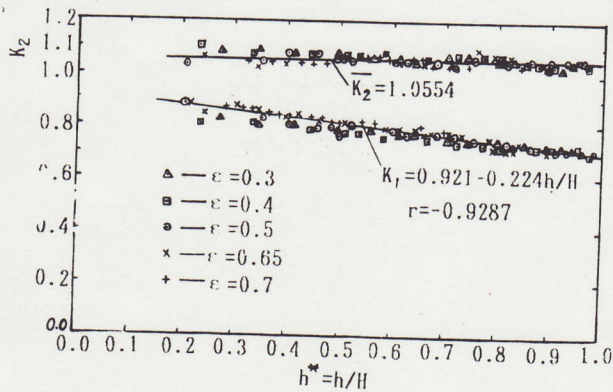


图5 $K_1, K_2-h/H$ 关系

式(23)、(24)代入式(12)时, 得到一个流量系数表达式

$$C_d = 2.03532\sqrt{1 + 0.3698h/H}, \quad (25)$$

取 $h/H=0.2-1.0$ 时, $C_d=2.109-2.382$, 可见, C_d 随水深 h 的增加而加大.

3. C_d 回归值 流量系数 C_d 亦可根据实测 Q 与 h 数据按式(13)回归取得. 具体方法是: 先令 Q 与 H_0 关系为幂函数

$$Q = AH_0^B, \quad (26)$$

式(26)两边取对数得: $\ln Q = \ln A + B \ln H_0,$ (27)

令 $Y = \ln Q, X = \ln H_0$ 时构成直线相关回归方程 $Y = A' + BX,$ (28)

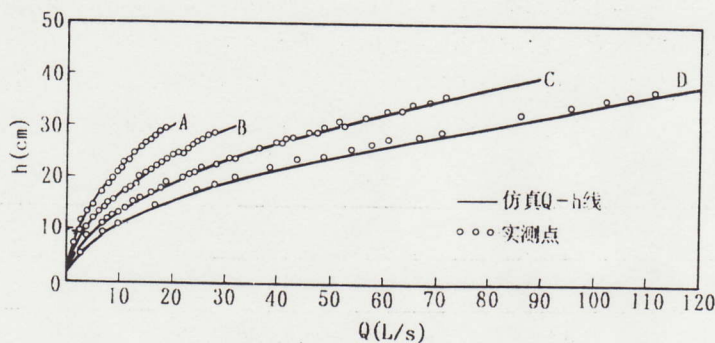
上式中 $A, B, A' = \ln A$ 皆为回归常数.

将原始数据 Q 与 $H_0, H_0 = h + Q^2 / (2gA^2)$ 关系按式(27)、(28)转换, 并输入线性回归计算机程序可求得 A, B 值. 注意到 Q 与 H_0 的平方成正比[如式(13)], 故 B 应等

于2. 因此考虑在 H_0 值中加入一个水位零点修正值 Δ ⁽⁶⁾ (Δ 反映了零点测量误差及边界层位移厚度等因素的影响⁽⁴⁾), 则回归自变量成 $X = \ln(H_0 + \Delta)$. 调节 Δ 值, 使回归结果中 $B=2$ 时, 得到 $A = e^{A'}$, $C_d = A\sqrt{P}$. 回归流量公式可写为

$$Q = C_d (H_0 + \Delta)^2 / \sqrt{P}. \quad (29)$$

采用回归法所取得的部分成果如表1所示. 由表可见, C_d 随 R 、 H 、 ε 的增大而减小, 相关系数 r 接近于1, 表明观测值之间的相关关系极好. 从误差值看, δ 值在0.138—0.929%之间, 实测 Q 与回归 Q 值之间的离差极小, 表明测试精度较高. 表中 Δ 皆为负值, 变化在-1.5—-8.5mm之间. 平均值为 $\Delta = -4.96\text{mm} \approx -5\text{mm}$. 假定上游水尺的零点抬高5mm时, 流量公式可以近似采用式(13)、(14)和(15).



A: $R=0.1\text{m}$, $H=0.3\text{m}$, $\alpha=9.5^\circ$, $\varepsilon=0.3$; B: $R=0.1\text{m}$, $H=0.3\text{m}$, $\alpha=9.5^\circ$, $\varepsilon=0.5$;
C: $R=0.15\text{m}$, $H=0.4\text{m}$, $\alpha=9.5^\circ$, $\varepsilon=0.65$; D: $R=0.3\text{m}$, $H=0.6\text{m}$, $\alpha=8.8^\circ$, $\varepsilon=0.65$;

图6 $Q-h$ 模拟结果及检验

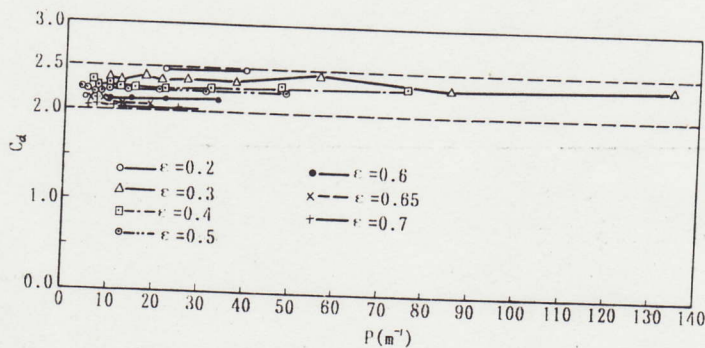


图7 模拟回归结果 $C_d = f(P, \varepsilon)$

水力电算模拟取得了与试验结果吻合良好的 Q 与 h 关系(图6). 因此就更大尺寸范围 U 型渠道($R=0.1-1.0\text{m}$, $H=0.3-1.5\text{m}$, $\alpha=0-15^\circ$)和不同收缩比($\varepsilon=0.2-0.7$)的量水槽进行了模拟, 取得49组 $C_d = f(R, H, \alpha, \varepsilon, P)$ 数据, 部分结果点绘入图7. 考虑23组试验结果共72组试验(表1)模拟数据, 进行逐步回归分析得到 C_d 的另一表达式为:

$$C_d = 1.96P^{0.011} \varepsilon^{-0.13}, \quad (30)$$

相关系数 $r=0.8369$, 标准差 $\delta_e=2.81\%$.

将式(25)、(30)分别代入式(13)时, 得到两个可供选择的流量公式

$$Q = 2.03532\sqrt{1 + 0.3698h/H} H_0^2 / \sqrt{P}, \quad (31)$$

$$Q = 1.96P^{0.011} \varepsilon^{-0.13} H_0^2 / \sqrt{P}, \quad (32)$$

四、量水性能分析

(一) 测流精度 测流精度通常用相对百分误差的大小表示. 测流中误差是流量公式中诸因素误差的组合⁽³⁾, 根据流量公式(14), 平底抛物线形无喉段量水槽的标准测流误差, 用下式^(4,6)表示为

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_{cd}^2 + \delta_{cv}^2 + (2\delta_h)^2 + (0.5\delta_p)^2}, \quad (33)$$

式中: δ_Q 为流量相对百分误差, δ_{cd} 、 δ_{cv} 、 δ_p 分别为 C_d 、 C_v 、 h 、 P 的相对百分误差.

由于平底抛物线形无喉段量水槽在自由出流条件下工作, 上游水位稳定($Fr < 0.5$). 另一方面, 由于它结构简单, 易于施工, 喉口尺寸可由钢(木)面板严格控制, 故施工和测量因素的误差较小(表 2). 流量系数 C_d 的误差可由式(25)、(30)估计, 如表 2.

表 2 测流误差估计

项 目	相对误差(%)	误 差 源
δ_{cv}	± 0.1	据式(15), 取决于迭代误差
δ_h	± 0.5	平均水深取 20cm, 读数精确到 0.1cm
δ_p	± 0.1	喉口面板制造及安装误差
δ_{cd} 式(25)	± 3.33	据式(23)、(24): $\delta_{cd} = \sqrt{\delta_{k1}^2 + \delta_{k2}^2 + (0.5\delta_h)^2}$ $\delta_{k1} = 2.81\%$; $\delta_{k2} = 1.76\%$
δ_{cd} 式(30)	± 2.86	据式(30): $\delta_{cd} = \sqrt{\delta^2 + \delta_e^2}$ $\delta \approx 0.544\%$ (表 1); $\delta_e = 2.81\%$

表 2 中数据代入式(33)可得, 流量公式(31)的标准测流总误差为 $\delta_Q = \pm 3.48\%$; 流量公式(32)的标准测流总误差为 $\delta_Q = \pm 3.03\%$. 最小水深 $h = 0.1\text{m}$ 时, $\delta_h = \pm 1\%$, 式(31)、(32)的测流中误差分别为 $\pm 3.89\%$ 、 $\pm 3.49\%$. 与实测数据的对比如表 3 所示.

由表 3 可见, 式(31)的误差较大, 部分误差难以接受(超出 $\pm 5\%$); 而式(32), 无论大小渠槽和高低水位, 均有良好的精度, 误差为 $0 - \pm 2.8\%$, 满足灌排测流要求 ($\pm 5\%$).

(二) 测流幅度 测流幅度是指可精确测量之最大流量与最小流量的比值^(4,6). 目前资料所给平底抛物线形无喉段量水槽的研究试验范围为 $0.1\text{m} < H_0 < 1.5\text{m}$, 在此范围内可使用流量公式(13)、(30), 或式(14)、(30)、(15), 并有合理的量测精度. 其量水幅度为

$$k = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} = \frac{C_{dmax} H_{0max}^2}{C_{dmin} H_{0min}^2}, \quad (34)$$

$H_{0max} = 1.5\text{m}$ 时, $C_{dmax} = 2.48$; $H_{0min} = 0.1\text{m}$ 时, $C_{dmin} = 2.09$. 则 $K = (2.48 \times 15^2) / (2.09 \times$

$0.1^2) \approx 266$.

由此可见, 平底抛物线形无喉段量水槽的测流幅度相当大, 完全可以满足灌溉(特别是井、渠结合渠道)和排水(排污)的测流要求。

表3 测量流量公式(31)、(32)误差分析

上游水深 h(cm)		10	15	20	25	30	35
图 6. 槽 A $\epsilon=0.3$	实测流量 $Q(L/s)$	2.1	4.9	8.5	13.5	19.5	
	式(31)计算 $Q(L/s)$	2.1(0)	4.2(-14.3)*	8.6(1.2)	13.6(0.7)	19.6(0.5)	
	式(32)计算 $Q(L/s)$	2.1(0)	4.8(-2)	8.6(1.2)	13.4(-0.7)	19.4(-0.5)	
图 6. 槽 B $\epsilon=0.5$	实测流量 $Q(L/s)$	3.5	7.6	13.6	21.5	31.3	
	式(31)计算 $Q(L/s)$	3.4(-2.8)	7.8(2.6)	14.1(3.6)	22.3(3.7)	32.5(3.8)	
	式(32)计算 $Q(L/s)$	3.4(-2.8)	7.7(1.3)	13.8(1.5)	21.7(0.9)	31.4(0.3)	
图 6. 槽 C $\epsilon=0.65$	实测流量 $Q(L/s)$	5.3	12.1	22	34.5	50	69.5
	式(31)计算 $Q(L/s)$	5.4(1.9)	12.6(4.1)	22.9(4.1)	36.5(5.8)	53.4(6.8)	73.8(6.2)
	式(32)计算 $Q(L/s)$	5.4(1.9)	12.2(0.8)	22.1(0.5)	34.9(1.2)	51(2)	70.2(1)
图 6. 槽 D $\epsilon=0.65$	实测流量 $Q(L/s)$	7.9	18	32	51	74	100
	式(31)计算 $Q(L/s)$	8(1.3)	18.5(2.8)	33.5(4.7)	53.2(4.3)	77.6(4.9)	106.9(6.9)
	式(32)计算 $Q(L/s)$	8(1.3)	18.2(1.1)	32.5(1.6)	51(0)	74(0)	101.5(1.5)

* 括弧内数值为流量的百分比相对误差(%), 下同。

(三) 临界淹没界限 临界淹没界线定义为下游水位即将影响上游水位时量水槽前后水位的比值^[4,6] :

$$S = h_2 / h, \quad (35)$$

式中: S 为临界淹没度, h_2 、 h 分别为临界状态下的槽后水深和槽前水深(m)(以喉口底部为基准面)。

试验显示(图 8), $S = 0.85 \sim 0.91$, 平均值为 0.88。这一数值较大, 表明平底抛物线形无喉段量水槽具有较宽的自由出流范围, 不易造成淹没出流。

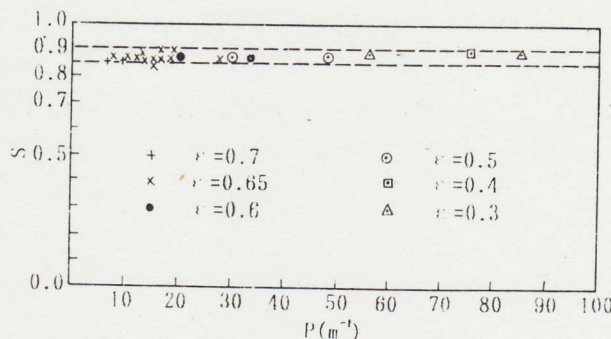


图 8 临界淹没度实测点

(四) 壅水特性 抛物线形断面过流能力较强(相同过水断面面积时, 其水力半径大

于三角形、矩形、梯形和 U 形, 仅次于半圆形)⁽¹⁾. 因此, 选择适当的喉口断面收缩比(保证自由出流的最大 ε)时, 槽前壅水较小. 对于 U 型渠道, $R < 0.4\text{m}$ 时, 壅水高度 $\Delta h = h - h_0 < 0.1\text{m}$; $R = 0.4 - 0.7\text{m}$ 时, $\Delta h < 0.15\text{m}$; $R = 0.7 - 1.0\text{m}$ 时, $\Delta h < 0.2\text{m}$.

五、设计与应用

(一) 适宜收缩比的选择 验算表明, 对于粗糙率 $n \approx 0.015$ 的混凝土衬砌渠, 比降 $S_0 = 1/200 - 1/600$ 时, 应选 $\varepsilon = 0.7 - 0.65$; $S_0 = 1/600 - 1/1000$ 时, 选 $\varepsilon = 0.65 - 0.5$; $S_0 = 1/1000 - 1/1500$ 时, 选 $\varepsilon = 0.5 - 0.4$; $S_0 = 1/1500 - 1/3000$ 时, 选 $\varepsilon = 0.4 - 0.2$. n 增大或减小时, ε 可适当减小或增大. 量水槽下游有跌水或陡坡等水位突降时, 取 $\varepsilon > 0.5$.

(二) 尺寸计算及安装 已知 ε 及行进渠断面面积 A_0 时, 由式(4)确定 P . 进、出口渐变段长度相同, 由下式计算:

$$L_1 = L_2 = 3(B - b), \quad (37)$$

其中: B 为行进渠口宽(m); b 为喉口宽(m); L_1 、 L_2 分别为进出口渐变段长度(m). 水尺可置于进口渐变段末端以上 $(1-2)H$ 距离处. 量水槽安装宜采用喉口预制、整体现浇法. 喉口控制面板可用钢(木)材料制作. 喉口安装时保证其中心线与行进渠中心线一致, 喉口底部与水尺处的渠底相平. 渐变段可用直尺刮成, 操作简便.

流量表的制定需要大量试算, 工作量大, 宜采用电子计算机运算(已备有程序). 平底抛物线形无喉段量水槽的工程量较矩形无喉段量水槽减少约 30%.

六、结 论

1. 本文针对曲线型渠道特点提出了新型平底抛物线形无喉段量水槽. 流量公式如式(13)、(14)、(15)、(30). 这种量水槽的测流精度较高, 误差小于 3.5%; 临界淹没度达到 $S = 0.85 - 0.91$; 其过流能力强, 低水位测流精度高, 量水幅度可达 266, 壅水高度较小.

2. 由于该量水槽为平底敞开式, 利于泥沙及悬(漂)浮物通过. 它的收缩比可根据渠道坡降有较大的选择范围($\varepsilon = 0.2 - 0.7$), 因此, 这种量水槽能更好地适应缓坡渠道测流, 不致产生淹没出流和大的壅水. 其结构简单, 流线形好, 施工方便, 工程量和造价较小.

3. 平底抛物线形无喉段量水槽能适应各种曲线形输水渠槽的流量测量.

参 考 文 献

- (1) 陕西省水利水保厅编, U 形渠道. 水利电力出版社, 1986 年.
- (2) 川田裕郎编, 流量测量手册. 罗凑等译, 北京计量出版社, 1982 年.
- (3) Herschy, R. W., Streamflow Measurement. Elsevier Applied Science Publishers, London UK 1985.
- (4) Ackers, P. et al., Weirs and Flumes for Flow Measurement. John Wiley & Sons Ltd,

1978.

- (5) 陈炯新等编, 灌区量水工作手册. 水利电力出版社, 1983年.
- (6) International Standards Organization, Liquid Flow Measurement in Open Channels: ISO, Switzerland, pp. 1973—1984.
- (7) Hager, W. H., Venturi flume of minimum space requirements. *J. Irri. Drain. Div.*, ASCE, Vol. 114, No. 2, pp. 569—583, 1972.
- (8) 陕西机械学院水科所, U型渠测流的试验报告. 1987年.

Experimental study on flat parabolic throatless flume for flow measurement

Wang Zhi Zhu Fengshu Liu Xiaoming
(Northwestern Agric. University)

Abstract

117 A new flat parabolic throatless flume ^{for} flow measurement is developed. The experimental results show that this flume has the advantages as: low head loss, high accuracy, well streamlined, low cost and high critical submerged ratio. The formula for calculating the discharge is deduced and the law of the variation of discharge coefficient is ~~to be~~ studied both in physical model and mathematical model. The design procedures are also presented.

Key words level bottom parabolic, cut-throat flume, the U-typed channel, the area constriction ratio, the coefficient of discharge, range of discharge measurement.