

文章编号: 1006-4710(2011)04-0417-06

U形渠道直壁式量水槽的标准设计和制作工艺研究

张志昌¹, 肖宏武², 毛兆民², 陈建刚³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省水利厅, 陕西 西安 710042;

3. 陕西咸阳秦安节水技术有限责任公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 通过对 U 形渠道直壁式量水槽的标准化研究, 提出了 U 形渠道直壁式量水槽的设计标准、制造标准和安装标准, 并在水尺上设计了流量读数, 提高了用水的透明度。

关键词: U 形渠道; 直壁式量水槽; 标准化

中图分类号: TV135

文献标志码: A

Research on Standardized Designment and Manufacturing Process of Straight Wall Type Water Measuring Flume in U-Shaped Channel

ZHANG Zhichang¹, XIAO Hongwu², MAO Zhaomin², CHEN Jianguang³

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Hydraulic Engineering Bureau of Shannxi Province, Xi'an 710042, China;

3. Shaanxi Xianyang Qin'an Water-Saving Technology Limited Liability Compang, Xianyang 712000, China)

Abstract: According to the standardized research of straight wall type water measuring flume in U-shaped channel, this paper proposes its design, manufacturing and installation standards, with the designing flow reading on the water gauge, whereby improving transparency of water-use.

Key words: U-shaped channel; straight wall of measuring flume; standardization

近几十年来, U 形渠道以其水力最优断面和节省土地而在全中国范围内得以广泛的推广和使用。在多年对 U 形渠道测流设施的研究中已提出了 U 形渠道的长喉道量水槽、抛物线形短喉道量水槽、直壁式量水槽和柱形量水槽。其中, 前三种量水槽已被陕西省水利厅和陕西省质量技术监督局定为陕西省地方标准^[1]。

U 形渠道量水槽经过多年的实践应用检测, 目前呈现出四个方面的问题, 即: ① U 形渠道的规格不统一(不同渠道不同设计规格), 尤其是渠道外倾角的变化较大($0^\circ \sim 20^\circ$), 因而为量水槽的标准化设计和施工带来困难; ② 制作工艺不标准, 所有量水槽的制作都是现场放模、手工制作, 制作精度达不到陕西省地方标准“U 形渠道量水槽的基本要求”(陕 GB61/T279—1999)的技术指标, 制作误差大; ③ 量水槽的表面光洁度达不到陕 GB61/T279—1999 的技术要求, 量水误差大; ④ 渠道底坡对测流的影响估计不足, 在量水槽出现淹没出流的情况下, 实际计算

流量时仍按自由出流计算。这些问题都直接影响量水槽的测流精度, 因此, 本研究对量水槽进行标准化设计和标准化制作的研究, 以使量水槽的体型、制作工艺、安装工艺达到标准化的设计、生产、安装, 从而提高量水槽的测流精度。

1 U 形渠道直壁式量水槽的标准化设计

1.1 U 形渠道直壁式量水槽的体型^[2]

U 形渠道直壁式量水槽由喉道段, 两端过渡段及上游水尺组成(见图 1)。喉道底部为原 U 形渠道的底部, 两端过渡段为椭圆曲线, 曲线方程为:

$$\frac{x^2}{(0.7B_0)^2} + \frac{y^2}{[(B_0 - b)/2]^2} = 1 \quad (1)$$

式中, b 为喉道宽度, B_0 为渠顶宽度, D 为 U 形渠道的直径。

B_0 的计算式为:

$$B_0 = 2R\sin\theta + 2(H - T)\tan\beta \quad (2)$$

$$T = R(1 - \cos\theta) \quad (3)$$

收稿日期: 2011-05-10

基金项目: 水利部“948”基金资助项目(CT200302)。

作者简介: 张志昌(1954-), 男, 陕西西安人, 教授级高级工程师, 研究方向为水工水力学。E-mail: zhangzc@xaut.edu.cn。

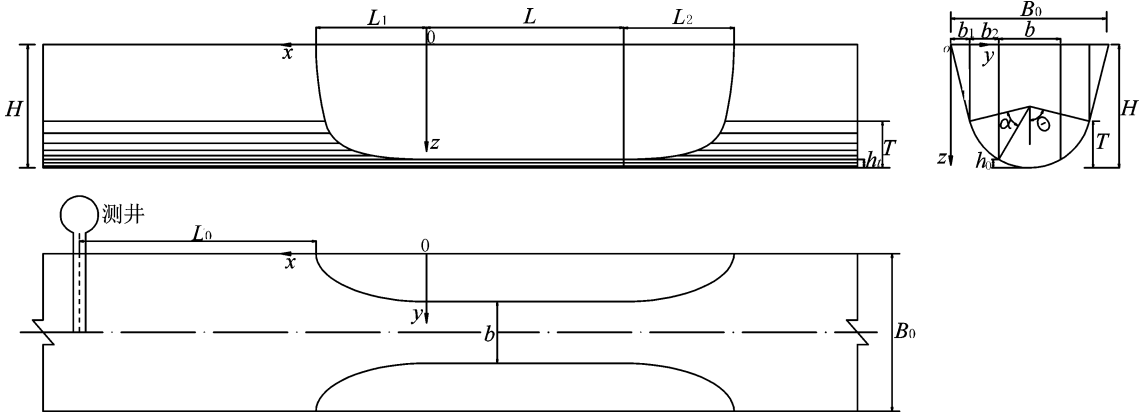


图1 U形渠道直壁式量水槽

Fig. 1 The straight wall type water measuring flume in U-shaped channel

图1中 h_i 的计算公式为:

$$h_i = R(1 - \sqrt{1 - \lambda^2}) \quad (4)$$

式中, R 为U形渠道的半径, θ 为圆心半角, T 为U形渠道圆弧段与上部直线段相切处距渠底的高度, β 为渠道外倾角, h_i 为喉道底部距渠底的距离, λ 为收缩比,可定义为:

$$\lambda = b/D \quad (5)$$

1.2 U形渠道直壁式量水槽曲面段设计

U形渠道直壁式量水槽过渡段为曲面,过渡段曲面与U形渠道的相交线为曲线,该曲线虽可由作图法确定,但比较麻烦,现根据其几何关系对相交曲线进行计算。

在如图1所示的平面图上,设U形渠道直壁式量水槽过渡段曲线的坐标为 x 和 y ,过渡段曲线方程为公式(1)。当U形渠道的参数(R 、 H 、 θ 、 β)和U形渠道直壁式量水槽的喉道宽度 b 确定以后,即可用方程(3)计算 T ,用方程(2)计算 B_0 ,用方程(1)确定过渡段的长度 L_1 和 L_2 ($L_1 = L_2 = 0.7B_0$)以及过渡段起点的宽度 $b_1 + b_2 = (B_0 - b)/2$ 。

设铅垂方向为 z 轴,向下为正,在 y 方向坐标原点到U形渠道切点之间的水平距离为 b_1 ,则 b_1 计算为:

$$b_1 = (H - T) \tan \beta = (H - R + R \cos \theta) \tan \beta \quad (6)$$

则 z 值可计算为:

$$z = \frac{H - T}{b_1} y = \frac{H - R + R \cos \theta}{b_1} y \quad (7)$$

y 的取值范围为 $0 \sim b_1$ 。

设切点到喉道起点之间的水平距离为 b_2 ,则:

$$b_2 = \frac{B_0 - b}{2} - b_1 \quad (8)$$

在此范围内 y 、 z 值计算为:

$$y = b_1 + b_{2i} \quad (9)$$

$$z = R + \sqrt{R^2 - (b_2 - b_{2i} + b/2)^2} = R + \sqrt{R^2 - (B_0/2 - b_1 - b_{2i})^2} =$$

$$R + \sqrt{R^2 - (B_0/2 - y)^2} \quad (10)$$

式中, b_{2i} 为将 b_2 分为任意宽度的水平距离。 y 的取值范围为 $y = b_1 \sim (b_1 + b_2)$ 。

算例1:某U形渠道,已知渠道的直径 $D = 40$ cm,渠深 $H = 40$ cm,渠道的外倾角 $\beta = 14^\circ$,渠道的圆心半角 $\theta = 76^\circ$,采用U形渠道直壁式量水槽测量流量,量水槽的收缩比 $\lambda = b/D = 0.5$ 。计算量水槽的过渡段与U形渠道的相交线。

将有关参数代入式(3)则有 $T = 15.162$ cm,由式(2)得 $B_0 = 51.198$ cm,由式(5)得 $b = 20$ cm,由式(1)得过渡段曲面方程为 $x^2/35.838^2 + y^2/15.599^2 = 1$,由式(6)得 $b_1 = 6.193$ cm,由式(8)得 $b_2 = 9.406$ cm。用公式(1)、(7)和(10)计算 x 、 y 、 z ,计算时先假定一个 y 值,列表计算如下。

表1 算例表
Tab. 1 The example table

y/cm	x/cm	z/cm
15.599	0.000	37.321
15.0	9.835	36.961
14.0	15.806	36.293
13.0	19.807	35.533
12.0	22.897	34.665
11.0	25.410	33.670
10.0	27.505	32.517
9.0	29.272	31.157
8.0	30.766	29.502
7.0	32.027	27.354
6.193 9	32.893	27.726
5.5	33.537	22.059
5.0	33.947	20.054
4.0	34.640	16.043
3.0	35.169	12.032
2.0	35.543	8.022
1.5	35.672	6.016
1.0	35.765	4.011
0.5	35.820	2.005
0.0	35.838	0.000

由表中的数据点绘 $x-z$ 关系图,可得椭圆曲面与 U 形渠道弧面的交线,见图 1。

1.3 U形渠道直壁式量水槽喉道宽度的确定

为了减小量水槽喉道宽度的规格,文献[3]利用《优先数和优先数系》的国家标准^[4],对 U 形渠道直壁式量水槽的喉道宽度进行优选。优选后喉道宽度系列与渠道比降和渠道直径的关系见表 2。

表 2 不同比降和不同直径的量水槽喉道宽度 b
Tab.2 The different slopes and diameters of the throat wide b in water measuring flume

渠道比降 i	不同直径 D 所对应的量水槽喉道宽度 b/cm			
	$D=40\text{ cm}$	$D=50\text{ cm}$	$D=60\text{ cm}$	$D=80\text{ cm}$
1/500	25	32	40	50
1/600	20	25	32	50
1/700	16	25	32	50
1/800	16	25	25	40
1/900	16	20	25	40
1/1000	16	20	25	32
1/1100	13	20	25	32
1/1200	13	16	25	32
1/1300	13	16	20	32
1/1400	13	16	20	32
1/1500	13	16	20	32
1/1600	13	16	20	25
1/1700	13	16	20	25
1/1800	10	16	20	25
1/1900	10	16	20	25
1/2000	10	13	16	25
1/2100	10	13	16	25
1/2200	10	13	16	25
1/2300	10	13	16	25
1/2400	10	13	16	25
1/2500	10	13	16	25
1/2600	10	13	16	20
1/2700	10	13	16	20
1/2800	10	13	16	20
1/2900	10	13	16	20
1/3000	10	13	16	20

以陕西省泾惠渠三支渠为例,该支渠共有斗渠 41 条,渠道比降为 1/300 ~ 1/3000,在 $D40 \sim D60$ 范围内优选的量水槽喉道宽度有 5 种,即,40 cm、25 cm、20 cm、16 cm 和 13 cm。最常用的只有 3 种,即,40 cm、25 cm 和 13 cm。

1.4 喉道长度的确定

U 形渠道直壁式量水槽原设计喉道长度 $L =$

$1.25B_0$,为了验证喉道长度对流量的影响进行了模型试验。试验的渠道直径为 0.5 m、渠深 $H = 0.5\text{ m}$,渠道倾角分别为 14° 和 20° ,直壁式量水槽的喉道长度分别为 1.125 m、1.0 m、0.875 m、0.75 m 和 0.625 m,试验结果如图 2 所示。

由图 2 可见,当喉道长度为 0.75 ~ 1.0 m 时流量变化不明显,当喉道长度为 1.125 m 和 0.625 m 时,前者流量偏小,后者流量明显偏大。所以喉道长度在 0.75 ~ 1.0 m 范围内比较合适,这时相对喉道长度为 $L/H = 1.5 \sim 2.0$ 。

对于长喉道量水槽,国际标准推荐量水槽的喉道长度 L 大于或等于渠道中最大水深 H_{\max} 的 2 倍,也允许喉道长度 $L/H_{\max} = 1.49$,但要增加 2% 的不确定度^[5]。文献[6]认为喉道相对长度 L/H_{\max} 在 1.67 ~ 1.47 之间淹没度较高,流量误差相对较小。

U 形渠道直壁式量水槽原设计喉道长度 $L = 1.25B_0$,假设渠道中的最大水深为渠道深度 H ,渠道的外倾角 $\beta = 14^\circ$,圆心半角 $\theta = 76^\circ$,半径 $R = 25\text{ cm}$,由公式(2)求得 $B_0 = 64\text{ cm}$, $L = 1.25B_0 = 80\text{ cm}$,则 $L/H = 1.6$ 。这与文献[6]的试验结果一致,也在国际标准规定的范围内。另外,量水槽要实行工厂化生产,一般斗渠在直径为 60 cm 以下的喉道长度以不超过 1.0 m 为宜。所以,原设计的喉道长度是合适的,此长度对于制模和现场安装也是方便的。

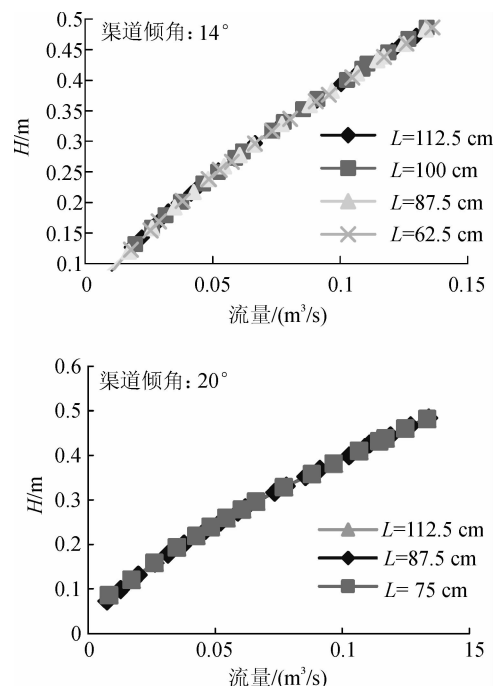


图 2 不同喉道长度对流量的影响
Fig.2 The influence to the discharge of different throat lengths

1.5 渠道倾角对流量的影响

U形渠道的外倾角范围在 $8^\circ \sim 20^\circ$ 之间,应用最多的是 14° 。

图3是渠道倾角为 14° 和 20° 的量水槽前水深与流量关系的试验结果。图4是利用边界层理论计算的渠道倾角分别为 8° 、 14° 和 20° 的槽前水深与流量的关系。

由图3可见,随着渠道倾角的减小,流量稍有增大,例如,当水深为34.73 cm时,倾角 14° 和 8° 流量相差了0.45%;倾角 14° 和 20° 流量相差了0.56%。且水深越小流量相差越小。实测结果与计算分析是吻合的。由此可以认为,渠道倾角对流量的影响可以忽略。

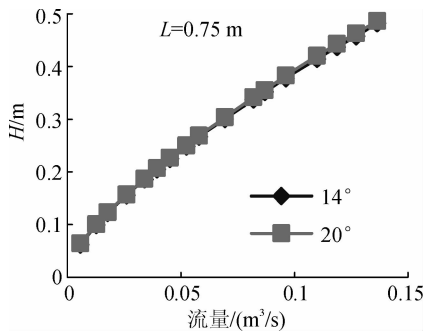


图3 渠道外倾角对流量的影响(试验值)
Fig.3 The influence to the discharge of outer slope (experiment)

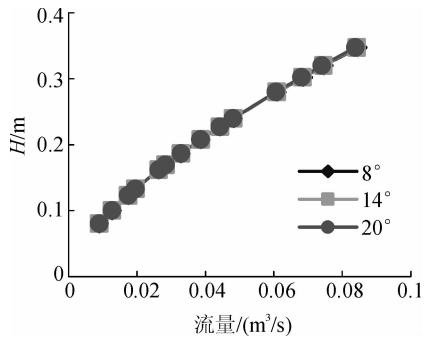


图4 渠道外倾角对流量的影响(计算值)
Fig.4 The influence to the discharge of outer slope (calculation)

1.6 水尺位置、水尺刻度和量水槽高度

水尺位置在量水槽的上游,距量水槽过渡段进口的距离为:

$$L_0 = 1.5B_0 \quad (11)$$

水尺最小刻度为5 mm,每5 cm标注高度及相应的流量,以使水量更加透明化。水尺示意图见图5(可以任选一种)。本研究中量水槽高度与渠道顶部同高。

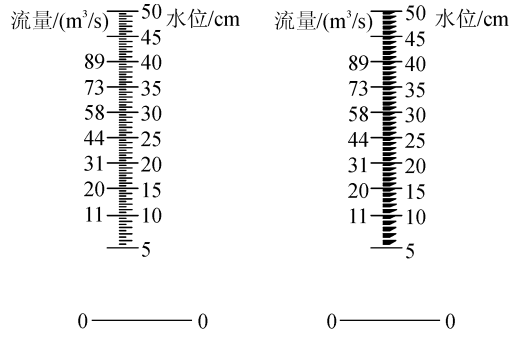


图5 水尺示意图
Fig.5 The sketch map of water gauge

1.7 U形渠道直壁式量水槽型号及参数系列命名

型号系列选择以主要尺寸形成参数系列。型号命名规则见图6。

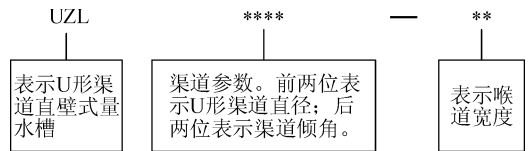


图6 U形渠道量水槽型号命名规则
Fig.6 The named regular about the type of water measuring flume in U-shaped channel

例如:应用于D60,倾角为 14° 的渠道上,喉道宽度为30 cm的量水槽,其型号表示为UZL6014-30。

1.8 大于或小于渠道倾角 14° 时过渡段曲线的处理

过渡段曲线均以 $\beta = 14^\circ$ 进行设计,如果渠道倾角大于 14° ,将曲线末端垂直于水流方向延长至渠岸,如果渠道倾角小于 14° ,对多余部分进行打磨。

1.9 流量公式

如果已知量水槽前的水深,可以用边界层理论计算通过量水槽的流量。文献[7]给出的流量公式为:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g}(b - 2\delta_1) \left(h + \frac{Q^2}{2gA_0^2} - \frac{C}{b - 2\delta_1}\right)^{3/2} \quad (12)$$

式中, h 为量水槽水尺处的水深, C 计算为:

$$C = R(1 - \sqrt{1 - \lambda^2})(b - 2\delta_1) + \frac{\pi}{45} R \delta_1 \arctan \frac{1 - \sqrt{1 - \lambda^2}}{\lambda} - R^2 (\arcsin \lambda - \lambda \sqrt{1 - \lambda^2}) \quad (13)$$

式中, λ 为收缩比,定义为 $\lambda = b/D$; δ_1 为边界层的位移厚度,计算方法见参考文献[7-8],或者按国际标准的方法计算^[5]。国际标准规定对于具有良好表面光洁度的设备, δ_1/L 实际上处于0.002至0.004的范

围内。例如 $10^5 > L/K_s > 4\ 000, Re > 2 \times 10^5$ (K_s 为表面粗糙度, Re 为雷诺数), 可以假定 $\delta_1/L = 0.003$ 。由于 U 形渠道直壁式量水槽表面光洁度良好, 可以取 $\delta_1/L = 0.003$, 其中, L 为量水槽的喉道长度。

2 U 形渠道直壁式量水槽制作工艺

2.1 制作材料的选择

量水槽表面光洁度与制作材料密切相关。曾经考虑过钢材、铸铁、塑料制品、有机玻璃、混凝土等材料。钢材和铸铁造价很高, 制模费用也高, 而且容易失窃; 塑料和有机玻璃的造价相对于钢材和铸铁材料稍低, 但在太阳底下容易变形, 易于老化, 同时易失窃; 混凝土是水工结构上最为常用的一种材料, 最大的问题是量水槽的表面光洁度能否达到陕西省地方标准的技术要求。本研究通过试验确定了用混凝土材料制作量水槽以达到表面光洁度要求的工艺, 所以最终选用混凝土材料为制作量水槽的材料。

用混凝土材料制作量水槽, 水泥采用 425 号普通硅酸盐水泥, 粗骨料采用的是碎石, 级配为: 最大粒径 20 mm, 细骨料采用中砂, 细度模数为 2.3 ~ 3.0, 坍落度为 4 ~ 6 cm。按照抗冻指标的要求, 最小水泥用量不少于 270 kg/m^3 , 水灰比不大于 0.52。计算得出每立方米混凝土的配合比为: 水, 195 kg、水泥, 375 kg、中砂, 582 kg、碎石, 1 193 kg。

2.2 量水槽模具设计

U 形渠道直壁式量水槽是一个对称结构, 因此只须预制出一侧的结构。通过制作精度、安装难易程度、重量等方面的对比分析认定三部件方案为最理想方案(见图 7)。

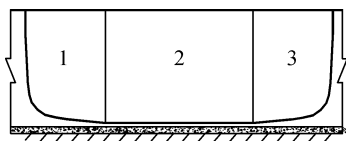


图 7 三部件方案

Fig. 7 The scheme of three parts

预制构件依量水槽形状做成 30 ~ 40 mm 的薄壳结构, 其与渠道之间的间隙在现场安装时用混凝土予以填充。

1) 喉道段模具设计

喉道段是图 7 中的第 2 部分, 为一矩形板, 由于渠道底部为曲面, 制作时需要考虑板厚对预制件高度的影响, 设板厚为 δ_0 , 为喉道与渠道交点处圆心角, H_4 为预制件与渠道衔接的间隙(见图 8)。 H_4 可计算为:

$$H_4 = R \left\{ \left[1 - \frac{b^2}{D^2} \right]^{1/2} - \left[1 - \frac{(b + 2\delta_0)^2}{D^2} \right]^{1/2} \right\} \quad (14)$$

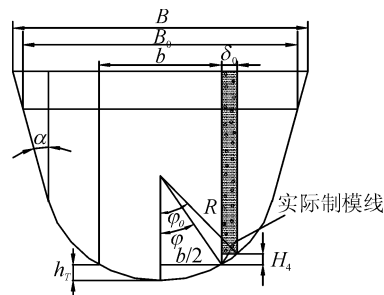


图 8 喉道段制模

Fig. 8 The model of the throat part

制模时需将预制板与渠道相接触的区域做成锐角形, 在考虑渠道底部不平整的情况下, 该锐角的上缘高度应大于 H_4 的计算高度, 以便于现场安装。

2) 过渡曲线段

由于混凝土板有一定的厚度 δ_0 , 因而需将曲面分为外曲面和内曲面(见图 9)。外曲面的计算依照公式(1), 内曲面的椭圆方程为:

$$\frac{x^2}{(0.7B_0 - \delta_0)^2} + \frac{y^2}{[(B_0 - b - \delta_0)/2]^2} = 1 \quad (15)$$

过渡段模具见图 10。

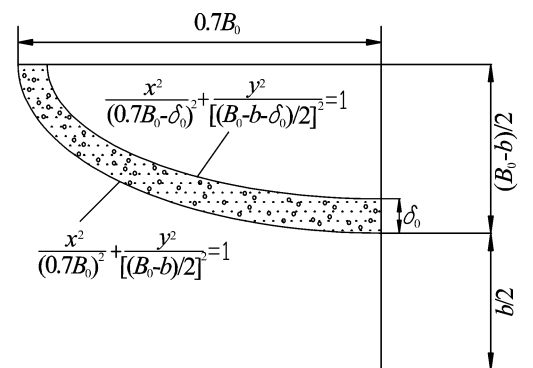


图 9 过渡段曲面制模

Fig. 9 The model of the transition camber



图 10 过渡段模具

Fig. 10 The mould of the transition part

3) 安装支架

为了实现 U 形渠道直壁式量水槽的标准化安装, 专门设计了可调节的安装支架见图 11。安装好的量水槽见图 12。



图 11 安装支架

Fig. 11 The setting kickstand



图 12 U形渠道直壁式量水槽

Fig. 12 The water measuring flume in U-shaped channel

3 量水精度

进行了直径分别为 0.2 m、0.4 m、0.44 m、0.5 m, 收缩比为 0.3~0.65、渠道倾角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 的模型试验, 将实测流量和用边界层理论计算的流量进行比较, 二者误差在 0%~3.96% 之间, 满足我国测流规范精度小于 5% 的要求。

泾惠渠三支渠目前已安装 U 形渠道直壁式量水槽 26 座, 在 5 分斗、17 斗和 22 斗的渠道上进行了原形观测, 实测流量与计算流量的对比结果见表 2。

表 2 实测流量与计算流量对比表

Tab.2 The comparison about practical and calculated discharges

斗渠名	水深/ (10^{-2} m)	计算流量/ (10^{-3} m ³ /s)	实测流量/ (10^{-3} m ³ /s)	误差/%
5 分斗	26.5	38.49	37	4.03
17 斗	33.5	79.41	82	3.16
	19.5	34.71	35	0.74
22 斗	21.0	50.48	52	2.92
	33.25	102.5	105	2.38

由以上模型与原型比较可见, 模型最大量水误差为 3.96%, 原型最大量水误差为 4.03%, 说明制作精度达到陕 GB61/T279—1999 的技术要求后量水误差与模型同量级。

4 量水槽的表面光洁度

对混凝土配合比和用模具制作量水槽进行研究, 研究结果表明本实验表面光洁度的混凝土糙率系数约为 0.011, 远小于一般明渠混凝土糙率为

0.014 的要求。

5 结 论

1) 研究了 U 形渠道直壁式量水槽的标准化设计, 即: 提出了量水槽过渡段曲面与 U 形渠道相交线的计算方法; 利用优先数确定了 U 形渠道直壁式量水槽的喉道宽度系列; 通过模型试验和边界层理论研究了喉道长度、渠道倾角、渠道比降对流量的影响; 提出了喉道长度、量水槽高度、渠道倾角大于 14° 和小于 14° 情况时的确定方法; 给出了水尺位置、水尺刻度和流量的标注方法; 提出了 U 形渠道直壁式量水槽的命名方法; 给出了 U 形渠道直壁式量水槽的标准设计和规格系列, 为量水槽的工厂化生产奠定了基础。

2) 研究了 U 形渠道直壁式量水槽的制作方法, 即: 通过试验掌握了用混凝土材料制作量水槽使表面光洁度达到陕西省地方标准要求的工艺, 最终选用混凝土材料作为量水槽的制作材料; 提出了三部件方案模具的制作方法; 给出了喉道部分和过渡段曲面部分模具的制作要求; 研制了可调节的安装支架。实现了量水槽的标准化制造和标准化安装。

参考文献:

- [1] 陕西省地方标准委员会. 陕 DB61/T280—1999 U 形渠道量水槽[S]. 西安: 陕西省水利厅, 陕西省质量技术监督局, 2000.
- [2] 张志昌. U 形渠道测流[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1997.
- [3] 肖宏武. U 形渠道量水标准化及自动化测流研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
Xiao Hongwu. Research on Standardization of U-shaped Channel Flow Measure and Automatic Flow Measurement [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T321-2005/TSO3:1973 优先数和优先数系[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2005, 12, 01.
- [5] Sector Committee for Materials and Chemicals. ISO 3680-7-2000 Measurement of Liquid Flow in Open Channels[S]. British: The Authority of Standards Committee, 1985.
- [6] 阮新建, 王长德, 柳树票. 明渠测流长喉槽结构优化及设计理论研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 22-26
Ruan Xinjian, Wang Changde, Liu Shupiao. Design and structure optimization of long-throat flume [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2001, 17(5): 22-26.
- [7] 张志昌, 肖宏武, 毛兆民. 明渠测流的理论和方法[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2004, 12.
- [8] Sector Committee for Materials and Chemicals. BS 4369-1979 Method of Measurement of Liquid Flow in Open Channels[S]. British: The Authority of Standards Committee, 1974.