

U形渠道圆头量水柱的数值模拟

刘嘉美 王文娥* 胡笑涛

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要 为进一步研究 U 形渠道圆头量水柱过流特性及测流精度,利用 Flow-3D 软件对 U 形渠道圆头量水柱水力特性进行数值模拟,将渠道水流流态及水面线的实测值与模拟值进行对比,同时研究不同规格的圆头量水柱流量与驻点水深的关系及水头损失情况,并拟合出其流量公式。结果表明:模拟值与实测值的相对误差 $<10\%$,两者具有较好的一致性,数值模拟结果可为圆头量水柱的结构优化提供依据。流量与驻点水深有很好的线性相关关系,相关系数 0.98;水头损失随收缩比的减小而增大,相比量水槽水头损失较小,但顺流长度过大,水头损失反而增大;根据数据拟合出的流量公式,最大相对误差为 9.74%,平均误差为 2.66%,满足精度要求。

关键词 渠道; U 形渠道; 圆头量水柱; 收缩比

中图分类号 S 274.4 **文章编号** 1007-4333(2014)01-0168-07 **文献标志码** A

Numerical simulation of water-measuring pillar with round head in the U-shaped channel

LIU Jia-mei, WANG Wen-e*, HU Xiao-tao

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract In order to study the flow characteristics and measuring accuracy of water-measuring pillar with round head in the U-shaped channel, the hydraulic characteristics was simulated based on Flow-3D software. The channel flow regime and the values of the water surface line that measured and simulated were compared for the study of the relationship between the water flow and the stagnation of the water depth, as well as the water head loss. The corresponding flow formula was derived. The results showed that the relative error between the measured and simulated values was $<10\%$, and both of them had good consistency. The numerical results could provide basis for the structure optimization of the water-measuring pillar with round head. It was found the existence of good linear relationship between flow and stagnation of water depth, and the correlation coefficient could reach 0.98. The head loss increased with the decrease of the contraction ratio. The loss was smaller compared to the flumes, however, the head loss would get to increase if the flow length was too big. Based on the calculation of the fitting flow formula, the maximum relative error was 9.74%, and the average error was 2.66%, which could meet the accuracy requirements.

Key words water channel; U-shaped channel; water-measuring pillar with round head; contraction ratios

我国北方灌区水源泥沙含量高,渠道比降较缓,研制测流精度高、水头损失小的量水槽具有现实意义。目前,灌区量水设施主要有 U 形渠道抛物线形无喉段量水槽^[1]、半圆柱形量水槽^[2]、机翼形量水

槽^[3]等。对新型量水设施的设计、研发主要采用试验方法^[4-6],研制周期长、成本高、人力物力消耗大,而采用数值模拟的方法研究过槽水流的水力特性,能够提高新型量水设施的研发效率。

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: “十二五”科技支撑项目(2011BAD29B02,2011BAD29B01); 国家自然科学基金项目(50909083); 中央高校基本科研业务专项资金资助(QN2011127); 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划

第一作者: 刘嘉美, 硕士研究生, E-mail: liujiamei2012@126.com

通讯作者: 王文娥, 副教授, 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

2 数学模型及计算方法

2.1 控制方程

2.1.1 连续性方程和 N-S 方程

一般来讲,非稳态的连续性方程和 Navier-Stokes 方程是描述牛顿流体运动的普遍适用方程^[15]。

1)连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

2)Navier-Stokes 方程

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\ &-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) + S_u \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \\ &-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right) + S_v \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \\ &-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right) + S_w \end{aligned} \quad (2c)$$

2.1.2 RNG $k-\epsilon$ 模型

RNG $k-\epsilon$ 模型来源于严格的统计技术,它提供了一个考虑低雷诺数流动粘性的解析公式,在耗散率 ϵ 输运方程中增加了附加项并考虑到了湍流漩涡,有效的提高了精度和预测的准确性,在更广泛的流动模拟中有更高的可信度和精度。对于不可压缩流动,其相应的输运方程^[15]为:

湍动能 k 方程

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \\ &\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon \end{aligned} \quad (3)$$

湍动耗散率 ϵ 方程

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \\ &\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

2.1.3 VOF 模型

VOF 模型^[16]是通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的容积比来模拟几种互不相溶的流体之间的交界面位置。模型对每一相定义独立的体积分,通过求解连续性方程得到相应的体积分,最终确定交界面。本研究所选用的 Flow-3D 软件,采用的 True VOF 法只计算含有液体的单元而不考虑只含气体的控制单元,为模拟水气二相流问题提供了更高的精度和效率。其方程为

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \bar{u}_m \cdot \nabla F = 0 \quad (5)$$

式中: \bar{u}_m 为混合流体的平均速度; t 为时间; F 为所需要的流体的体积分。

2.2 数值分析方法

为了逼真的模拟渠道流态,同时便于最终计算,模拟选取渠道长 11 m,以圆柱筒为零点,上游取 4 m,下游取 7 m,在计算区域采用六面体网格单元进行剖分,网格单元长度为 2 cm,网格总数约 4×10^5 个单元。根据量水槽的工作原理及特点,采用 VOF 法追踪自由表面,离散方法采用有限体积法。

渠道进口(ABCD)设为流量进口,设定上游水深并将体积分设置为 1,出口(A'B'C'D')为自由出流,上部空气入口(AA'D'D)设为 Symmetry 边界,渠道的整个底部(FF'G'G)以及边壁(EE'F'F、HH'G'G)选择固壁边界条件,并设置无滑移选项(图 3)。选择重力及紊流模型,模型中 Turbulent mixing length(TLEN)是定义紊流粘性系数、限制紊流耗散率及描述紊流涡旋特征长度的重要参数,一般取模型特征长度的 0.07 倍,计算公式为

$$TLEN = 0.07R = 0.07 \frac{A}{\chi} \quad (6)$$

式中: R 为 U 形渠道水力半径; A 为过水断面面积; χ 为过水断面湿周。

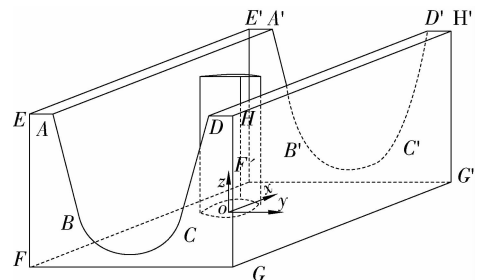


图 3 数值模拟控制体
Fig. 3 Simulation domain

3 结果与分析

3.1 模拟结果与试验结果对比

3.1.1 水流流态

通过模拟得到过槽水流流态,并与试验条件下水流流态进行对比(图 4),从图中可以看出,模拟与实测的水流流态基本吻合,量水柱上游比较平静,进入喉口后,自由水面开始跌落,在扩散段有菱形波出现,随着流量的增大,水面波动越来越明显,经过一段距离,水流趋于平稳。

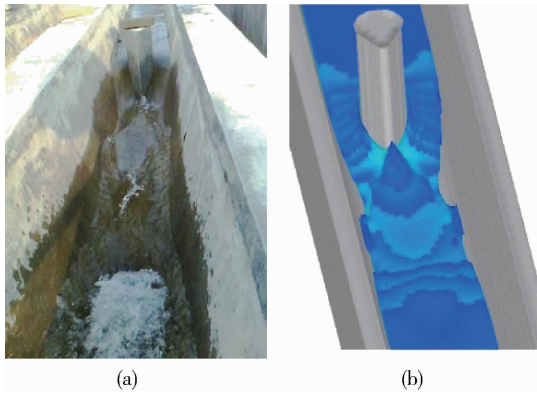


图 4 水流流态实测(a)与模拟(b)图
Fig. 4 Comparison chart of test and simulation flow

3.1.2 某一流量下纵剖面水面线

提取模拟与实测情况下纵剖面水面线的变化规律进行对比分析。由图 5 可见,渠道上游水面平缓,驻点处水位壅高,喉口处由于量水柱侧收缩的影响自由水面开始降落,量水柱末端水面波动较大,随后水面恢复平缓。通过对比可知,不同流量 Q (38.71、57.68 L/s)、不同收缩比 ϵ (0.43、0.50) 情况下模拟与实测水面线的变化规律趋势相同且模拟值与实测值较为接近,偏差率(按相对误差计算:偏差率=(模拟值-实测值)/实测值)最大为 7.7%,由此可以得出,利用 Flow-3D 软件对圆头量水柱进行数值计算的结果与实测结果较为接近。

3.2 模拟结果分析

3.2.1 流态分析

通过数值模拟可以得到 U 形渠道圆头量水柱在量水柱之前的流态为缓流,傅汝德数 $Fr < 0.5$,满足测流规范要求。待流到量水柱处,由于量水柱的

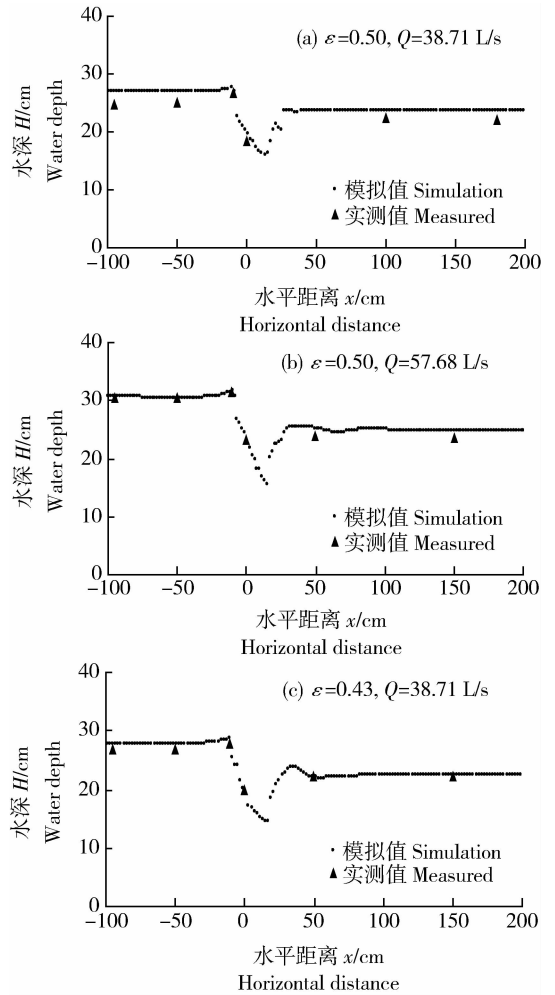


图 5 纵剖面水面线变化规律

Fig. 5 Variation of the water line of longitudinal profile

影响,使得驻点处的傅汝德数 Fr 减小至 0,量水柱两侧 Fr 不断增大,直至水位下降到临界水深位置,此处形成临界流, $Fr=1$ 。在流经喉口断面后,在惯性作用下, Fr 随流速继续增大,至扩散段紊流区达到最大,此时 $Fr > 1$,水流为急流,随后,流速在下游逐渐减小,经过一段距离,水流恢复成缓流, $Fr < 1$ (图 6)。

截取 6 个横断面(图 6(a))做流速分析得到流速分布剖面图(图 7)。可见,1-1 断面处,由于量水柱在纵向水流方向上的阻挡,使得驻点处的横断面水深呈中间高两边低的趋势,中部水流沿 x 方向速度减小为 0,而两侧速度增大,水流由中间向两侧流动;2-2 断面处,水流绕过量水柱流至量水柱喉口最窄处,由于受到量水柱侧向收缩的影响,流速开始急剧增大,自由水面出现跌落;3-3 断面处,水流流过

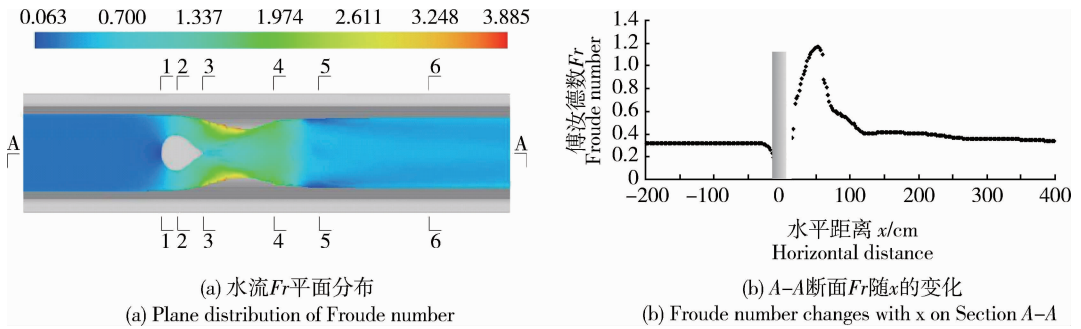
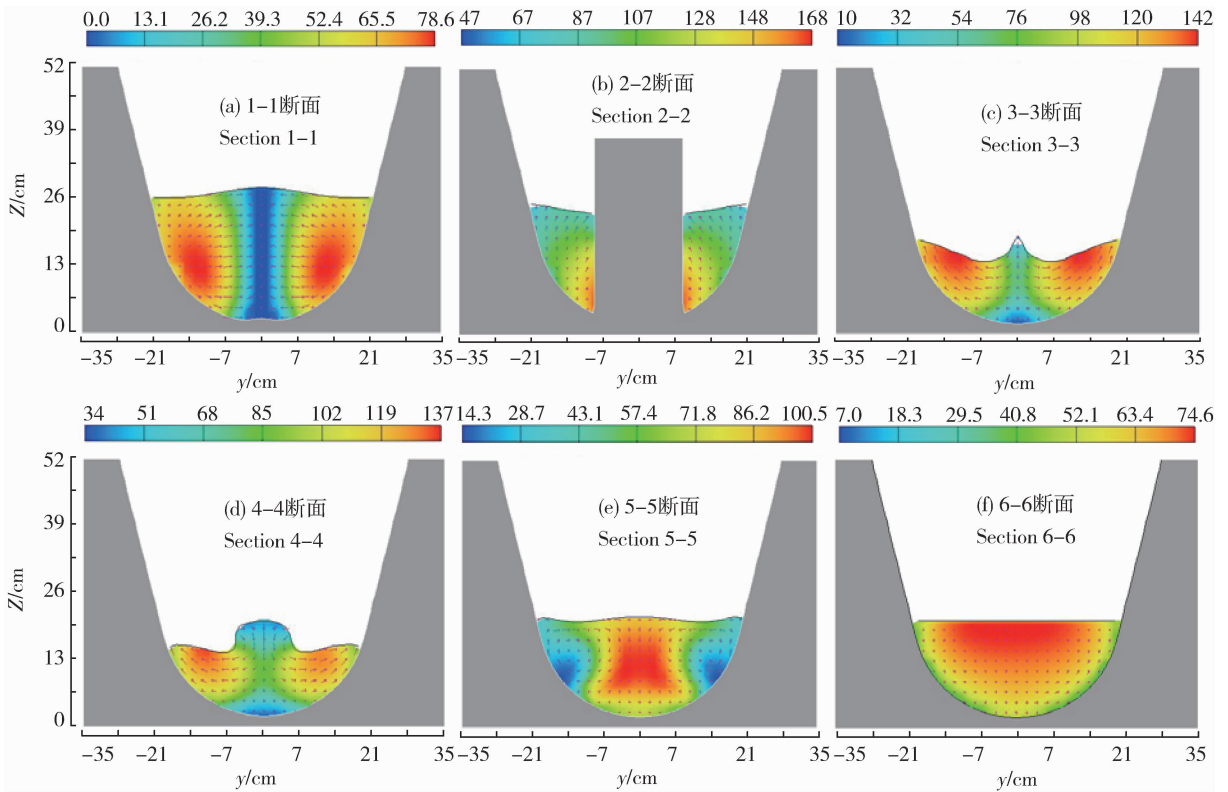


图6 渠道水流傅汝德数 Fr 的分布规律

Fig. 6 The distribution rule of the Froude number Fr



各断面具体位置见图 6(a)。

The specific location of each section shown in Fig. 6(a).

图7 渠道断面流速分布

Fig. 7 Velocity distribution of the channel section

量水柱尾部，由于惯性的作用，两侧流速继续增大，中部由于两侧水流的撞击作用，速度相对减小，水面紊乱；4-4 断面处，流速逐渐减小，水面紊动变化；5-5 断面处，流速进一步减小，水面趋于平静，但内部水流仍有一定的紊动；6-6 断面处，流速减小至稳定，水面流速大，渠底流速小，水流恢复平稳。

3.2.2 流量与驻点水深的关系

选取 $\epsilon=0.50, L=262.5 \text{ mm}$ 和 $\epsilon=0.43, L=$

300 mm 2 种规格的量水柱进行分析，得到不同流量下 (14.17、26.93、38.71、50.24、57.68 L/s) 驻点水深与流量的关系 (图 8)。可知，驻点水深与流量有很好的相关关系，相关系数均达 0.98 以上。由于临界水深不稳定，因此用驻点水深代替临界水深计算流量具有很好的精度。对于同一驻点水深 H_s ，收缩比 ϵ 越小，量水柱通过的流量越小，过流能力越小。

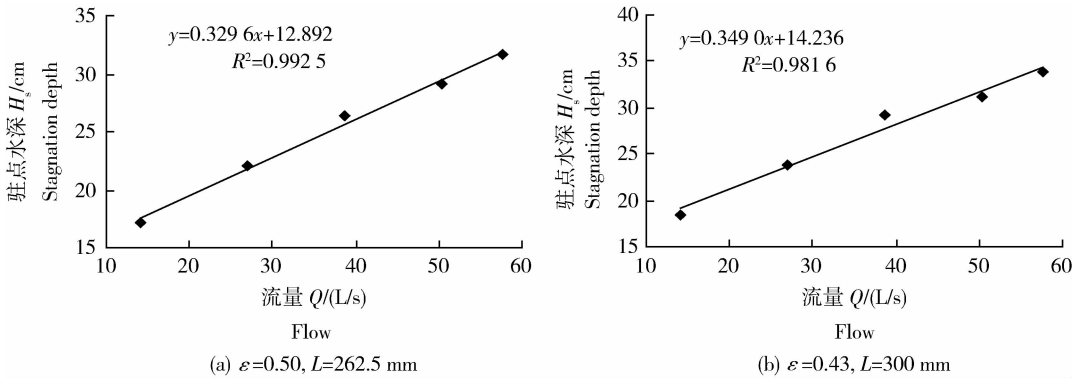


图 8 驻点水深 H_s 与流量 Q 的关系

Fig. 8 Relation between H_s and Q

3.2.3 水头损失

圆头量水柱过流为恒定非均匀流,以下游出口处渠底作水平面定为参考面,列出伯努利方程:

$$z_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_j \quad (7)$$

式中: z_1 为参考面到入口渠底的距离, m; h_1 为上游水深, m; α_1 为上游流速分布系数; v_1 为上游断面平均流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; z_2 为参考面到出口渠底的距离, m; h_2 为下游水深, m; α_2 为下游流速分布系数; v_2 为下游断面平均流速, m/s; h_j 为两断面之间的全部局部水头损失, m。取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.0$, 则式(7)变为

$$h_j = (z_1 - z_2) + h_1 - h_2 + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (8)$$

分析收缩比 $\epsilon=0.43, 0.50$ 和 0.57 这 3 种规格的量水柱在流量为 38.71 和 50.24 L/s 工况下的模拟结果,提取模拟得到的驻点水深与下游水深值来研究量水柱收缩比和顺流长度对上下游水头损失的影响。结果表明,在流量相同时,水头损失 H_j 随收缩比的减小而增大;流量和收缩比相同时,圆头量水柱水头损失小于圆柱形量水槽,当量水柱顺流长度过大,由于摩擦阻力的增加,水头损失增大;当收缩比在 $0.43 \sim 0.57$ 范围内时,水头损失平均占上游总水头的 10% 左右,小于长喉道量水槽的 13% 。

表 2 水头损失计算结果

Table 2 Calculation results of head loss

收缩比 ϵ Shrinkage ratio	顺流长度 L /mm Downstream length	流量 Q /(L/s) Flow	驻点水深 H_s /cm Stagnation depth	下游水深 h_2 /cm Downstream water depth	水头损失 H_j /cm Head loss	$(H_j/H_s)/\%$
0.57	150(参照)	50.24	26.97	23.58	2.20	8.17
	225	50.24	25.82	24.23	1.70	6.57
	300	50.24	26.31	23.63	2.16	8.22
0.50	175(参照)	38.71	27.12	22.86	2.88	10.62
	262.5	38.71	26.54	23.15	2.03	7.66
	350	38.71	27.09	23.04	2.69	9.93
0.43	200(参照)	38.71	28.22	22.42	4.46	15.27
	300	38.71	27.55	23.15	3.04	11.05
	400	38.71	28.14	22.69	4.03	14.32

3.2.4 流量公式与测流精度

对不同收缩比的量水柱,模拟流量分别为 14.17、26.93、38.71、50.24 和 57.68 L/s 5 种情况下的水流流态。通过数据分析可知,该圆头量水柱在自由出流时流量 Q 主要与收缩比 ϵ 和驻点水深 H_s 有关,通过逐步回归分析得到流量与驻点水深和收缩比的经验公式:

$$Q = 0.522 \sqrt{g\epsilon}^{0.5192} H_s^{2.5} \quad (8)$$

该式满足量纲和谐原理。对试验实测流量数据与按式(8)计算所得的流量数据进行比较。结果(图9)表明:计算流量与实测流量之间最大相对误差为 9.74%,平均相对误差仅为 2.66%。因此,本研究所建立的自由出流状态下该量水柱的流量公式满足测流精度要求且简单实用。

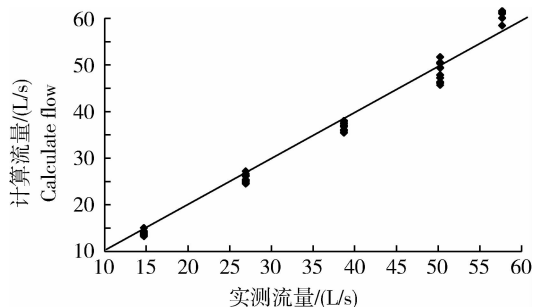


图9 实测流量与计算流量的比较

Fig. 9 Comparison between measured and calculate flow

4 结论与讨论

本研究根据临界流原理并结合圆柱绕流理论,建立了圆头量水柱这一新型量水设施的三维数学模型,采用 Flow-3D 软件对所建模型进行求解。通过不同流量和收缩比条件下纵剖面水面线变化规律的模拟值与实测值对比结果可知,测点处实测水深与模拟值非常吻合,最大误差为 7.7%,模拟流态与实际流态也基本吻合。利用 CFD 进行量水槽流场的数值分析可以缩短研制周期、降低开发成本,为量水设施的研制和推广提供一定的技术参考和建议。

利用本研究所建立的数学模型,在 5 种不同流量条件下,对不同收缩比的圆头量水柱的流态进行

模拟,研究流量与驻点水深的关系以及量水柱顺流长度和收缩比对水头损失的影响。结果表明:驻点水深与流量有很好的相关性,用驻点水深代替临界水深计算流量具有很好的精度;圆头量水柱相比圆柱形量水槽水头损失较小,但顺流长度过大,水头损失反而增大;通过所得数据拟合得到的流量公式,最大相对误差为 9.74%,平均误差为 2.66%,满足精度要求。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] Samani Z, Magallanez H. Simple flume for flow measurement in open channel[J]. J Irrig Drain Eng,2000,126:127-129
- [3] 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
- [4] 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,2004,22(2):38-41
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 王福军. CFD在水力机械湍流分析与性能预测中的应用[J]. 中国农业大学学报,2005,10(4):75-80
- [8] 郝晶晶,马孝义,王波雷,等. 基于VOF的量水槽流场数值模拟[J]. 灌溉排水学报,2008,27(2):26-29
- [9] 牟献友,李超,李国佳,等. U形渠道直壁式量水槽水力特性数值模拟[J]. 华北水利水电学院学报,2010,30(2):16-19
- [10] 于佳,吕宏兴. 矩形渠道半圆柱形量水槽数值模拟研究[J]. 节水灌溉,2010(8):8-10
- [11] 孙斌,吕宏兴,潘志宝. 矩形农渠机翼形量水槽水力特性数值模拟[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(2):155-158
- [12] 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
- [13] 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,2006,37(5):573-577
- [14] 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,2007,35(4):213-217
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用[M]. 北京:水利水电出版社,2004:7-10
- [16] Hirt C W, Hihols B D. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries[J]. J Comput Phys,1981,39:201-221