文章编号: 1672-3031(2008)01-0043-08

# 明渠岸边侧向取水的“取水角效应”研究

杨 帆
(中国水利水电科学研究院 水力学研究所, 北京 100044)

摘要: 从理论分析、水槽试验和数值模拟计算等多方面、多角度, 对明渠岸边侧向取水的“取水角效应”进行了定量研究。“取水角效应”指取水角度的改变对取水口附近水流结构的影响。研究结果表明, 取水角度的大小对取水口近区水域的水流结构影响非常显著。在 30°~90°的范围内, 取水角度越小, 口门断面处的流速分布越均匀, 口门上游主槽内的相对分流宽度越小, 分槽断面内的净进流宽度越大, 取水近区的流线越为平顺, 取水口的取水防沙条件越好。

关键词: 取水角效应; 无坝侧向引水; 取水防沙; 数值模拟
中图分类号: TV133 文献标识码: A

## 1 概述

在火/核电厂取水、灌溉用水等取水工程中, 明渠岸边无坝侧向取水是一种常见的取水方式, 其典型布置见图 1。图中“取水角 θ”为河道水流与引水渠轴线的夹角, 它的大小对取水口附近的水流结构有很大的影响。从理论上分析, 顺水流方向较小的取水角度有利于引导水流更加平顺地进入分槽, 但目前对锐角取水口水力特性的定量研究比较少, 本文将取水角的改变引起的取水近区的流场变化定义为“取水角效应”, 并通过对 3 种不同取水角度: 90°、45°和 30°取水口的水力特性的定量研究, 对明渠岸边侧向取水的“取水角效应”进行了分析。

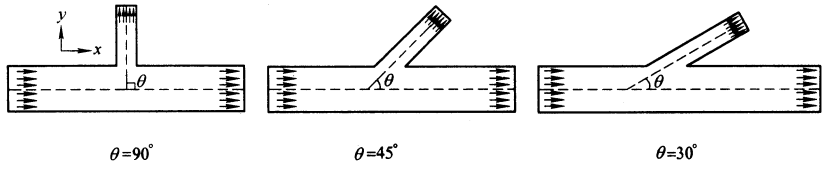



图 1 典型取水口布置

陈惠泉、曹继文等人的试验研究发现[2], 来流平均流速与取水平均流速之比 $\eta = u_\infty / u_1$ 对取水口的水流形态影响显著。因此本次研究中, 以分流流速比 η 为各工况的代表, 对不同角度取水口附近的水流结构进行了研究, 研究方法及组次见表 1。

表 1 研究方法及组次

| θ/(°) | η | 研究方法 | |
|---|---|---|---|
| | | 水槽试验 | 数值计算 |
| 45 | 1.4, 2, 3, 5, 10, 15 | √ | √ |
| 30 | 1.4, 2, 3, 5, 8, 10, 15 | – | √ |
| 90 | 1.4, 2, 3, 5, 10, 20 | – | √ |

收稿日期: 2007-11-01
作者简介: 杨帆(1982–), 女, 天津人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为水工水力学。E-mail: yangf@iwhr.com



© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 2　水槽试验[3]

试验水槽由主槽和分槽两部分构成。主水槽长 13.13m, 宽 1.85m, 深 0.50m; 分水槽长 4.00m, 宽 0.80m, 深 0.50m。主、分水槽平底相接, 交角为 45°。为了研究取水口附近的水流形态, 试验中采用三维 ADV 进行单点流速测量, 并根据不同测点处的流速情况进行综合分析, 最终得到取水口近区的流场。测点布置见图 2 和图 3。

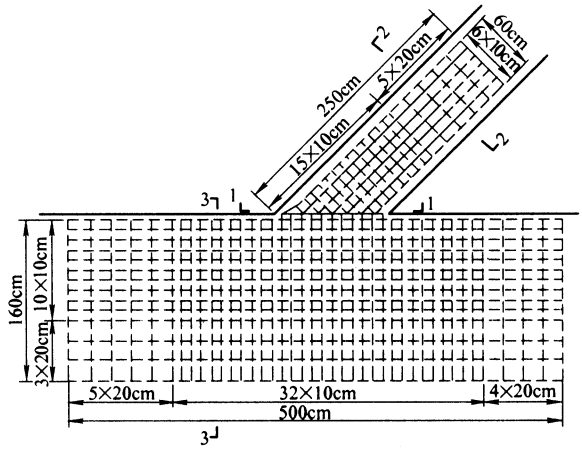



图 2　测点布置平面

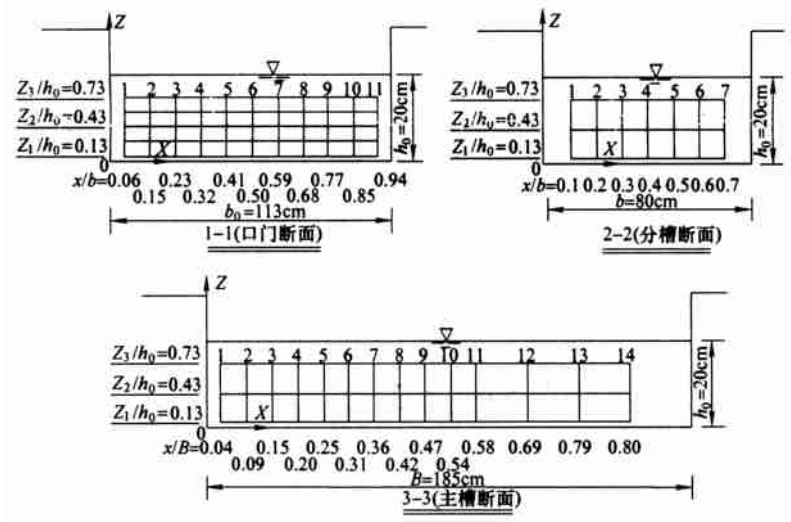



图 3　测点布置立面

试验时, 保持主槽来流流速一定, 改变取水流速, 利用 ADV 测量不同 η 时取水近区水域的三维流速分布, 并根据试验结果对 4 种工况下取水近区水域的水流结构及脉动特性进行分析, 寻求不同 η 条件下, 取水口近区水域三维水力特性的变化规律。在此基础之上, 对取水敏感部位“口门断面”的水力特性进行重点分析。试验条件及组次见表 2。

## 3　数值计算[4]

利用“雷诺应力模型”对取水角度为 45°、30°和 90°的明渠岸边侧向取水口进行了数值模拟。在离散方法上, 选择“有限体积法(FVM)”对控制方程进行离散。对于压力速度的耦合计算, 采用“压力校正法


© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　试验条件及组次

| 工况 | 来流流量 $Q_\infty$/(l/s) | 取水流量 $Q_1$/(l/s) | 来流平均流速 $u_\infty = Q_\infty/Bh_0$/(cm/s) | 取水平均流速 $u_1 = Q_1/bh_0$/(cm/s) | 分流流速比 $\eta = u_\infty/u_1$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 80.0 | 24.7 | 21.6 | 15.4 | 1.4 |
| 2 | | 17.3 | | 10.8 | 2.0 |
| 3 | | 6.9 | | 4.3 | 5.0 |
| 4 | | 3.5 | | 2.2 | 10.0 |

(SIMPLEC)”进行,即首先假定压力分布,用动量方程求解速度场,再用速度场是否满足连续方程来检验预先假定的压力场是否正确。利用大型计算流体力学计算软件 FLUENT6.1 进行紊流计算,并运用专业的数据后处理软件 Tecplot 进行数据结果的进一步处理。“雷诺应力模型”的基本控制方程为:

(1) 连续方程:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

(2) 运动方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} + F_i \tag{2}$$

(3) 雷诺应力方程:

$$\frac{D}{Dt}\overline{u_i' u_j'} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left[\frac{C_\mu}{\sigma_k}\frac{k^2}{\varepsilon}\frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} + \nu \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k}\right] + P_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\varepsilon_{ij} - C_1\frac{\varepsilon}{k}\left(\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3}\delta_{ij}k\right) - C_2\left(P_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}P_4\right) \tag{3}$$

(4) 紊动能 $k$ 方程:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left[C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}\frac{\partial k}{\partial x_k} + \nu \frac{\partial k}{\partial x_k}\right] + P_k - \varepsilon \tag{4}$$

(5) 紊动能耗散率 $\varepsilon$ 方程:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left[C_\varepsilon \frac{k^2}{\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} + \nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}\right] - C_{\varepsilon_1}\frac{\varepsilon}{l}\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial U}{\partial x_k} - C_{\varepsilon_2}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

以上方程中,各项系数的取值分别为:

| $C_\mu$ | $C_{\varepsilon_1}$ | $C_{\varepsilon_2}$ | $C_s$ | $C_{1ps}$ | $C_{2ps}$ | $C_{1ps}$ | $C_{2ps}$ | TKE | TDR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.09 | 1.44 | 1.92 | 0.22 | 1.8 | 0.6 | 0.5 | 0.3 | 1.0 | 1.3 |

数值计算中需要确定的边界条件有 5 个:

(1) 进口断面。考虑到进口断面与分水口距离较远,其断面流速分布对分水口的流速基本不会产生影响,因此取断面平均流速作为进口条件。紊动的边界条件采用紊动强度 I (取较小值 0.3%) 和水力直径[5]。

(2) 下游出口断面。认为下游出口断面的水流是充分发展的,规定出口断面上所有变量的法向梯度为零。

(3) 分槽下游出口。根据计算方案中不同的取水流量设定出口流速(即分槽断面平均流速)。

(4) 自由水面。参考前人的计算方法[5],将自由水面作为对称面来处理。

(5) 底部和侧壁。底部采用壁面函数的方法给定粗糙高度,侧壁视为光滑的固体边界。

## 4　“取水角效应”分析

“取水角效应”,即取水口敏感水域的水力特性随取水角度的变化规律。从理论上讲,较小的取水角度有利于引导水流更加平顺地进入分槽,但目前定量的研究较少。下文将从定量的角度分析取水角的改变对于取水口近区水域和口门断面处水力特性的影响。



© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对于45°取水口，同时进行了水槽试验和数值模拟计算，研究表明两种方法可互相验证，结果吻合良好。以口门断面的流速分布为例，将测量结果和计算结果进行对比，见图4。

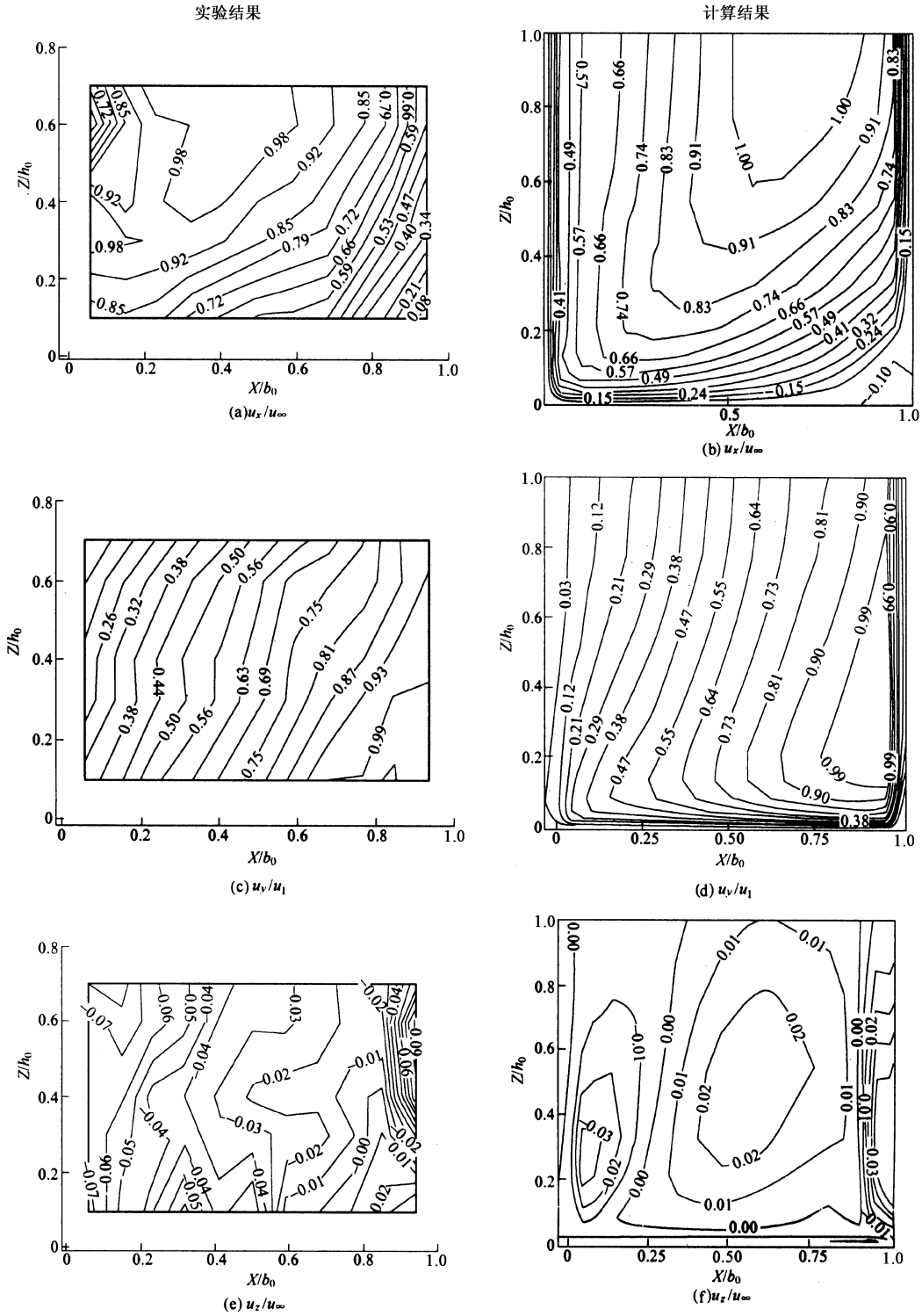



图4　口门断面处流速分布的对比

图4为口门断面处三维时均流速的等值线分布图。对于沿主流方向的相对分速度 $u_x/u_\infty$和取水方向的相对分速度 $u_y/u_1$（$u_1$ 为分槽取水的平均流速），计算结果和测量结果无论是在速度量值上还是在等值线分布情况上都比较接近。垂向相对流速 $u_z/u_\infty$的计算结果和测量结果有一定的差异，这是因为


© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$u_z$ 的量级较小,ADV 的测量精度也有限,产生一定的误差是难以避免的。总体而言,数值计算所采用的三维模型及相关参数的设定是合理的,能有效地应用于其他不同取水角度的取水口水流特性的计算和分析,如 θ= 90°和 θ= 30°。

**4.1**　取水近区水域的水力特性　取水口近区水域,指受取水分流影响,流态发生变化的区域。试验中对不同工况下近区水域的近底层和近表层流场进行了三维流速测量,将典型工况的流场情况绘于图5。

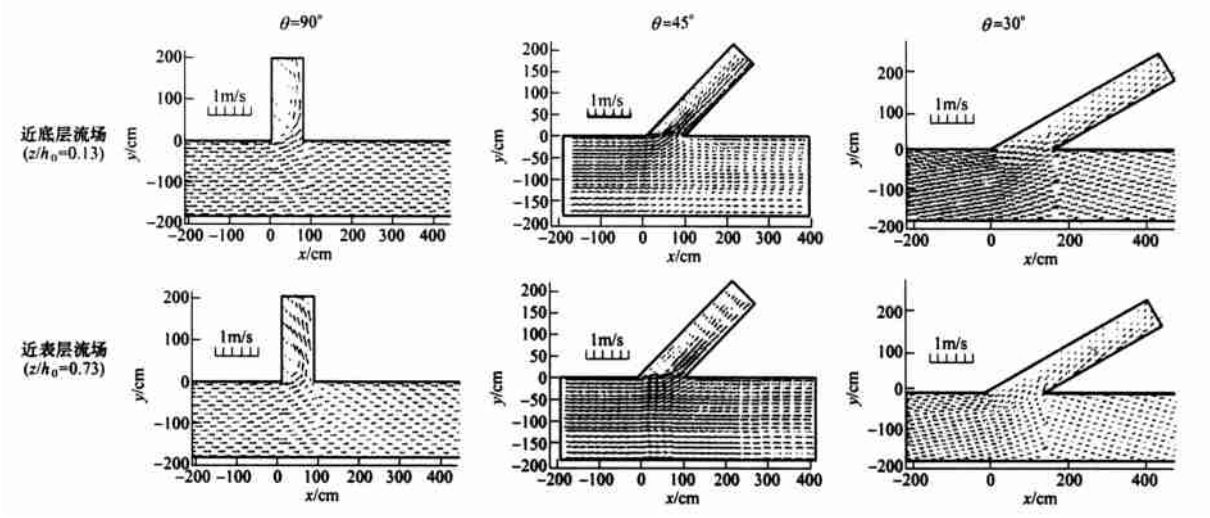



图 5　近区水域流场分布情况( η= 5)

当取水角 θ= 90°时,水流进入分槽时流线偏转角度很大,在分槽的左岸形成一个较大的回流区,使得分槽内的净进流宽度很小。当 θ= 90°时,由于近表层和近底层流场分布存在较大的差异,除了产生平面回流,在水深方向也产主了较强的横轴漩涡,挟沙能力较大。随着 θ 变小,近表层与近底层流场差异减少,横轴漩涡强度减弱,挟沙能力也大大降低。回流区内存在着紊动、漩涡、流线分离等复杂的水力学现象,是取水分流中应尽量减免的不利因素。当 θ= 45°时,主槽内分流线的曲率有所减小,分槽左岸虽仍存在回流区,但其宽度明显减小,净进流宽度明显增大。当 θ= 30°时,近区水域的流线更加平顺,分槽左岸仅在很小的区域内存在回流,净进流宽度最大。当取水角度逐渐减小时,回流区的形状由"短宽型"逐渐向"细长型"转变。

为了定量地研究取水角度对取水近区水流结构的影响,提出两个重要的参数:主水槽的分流宽度和分水槽的断面收缩比。

4.1.1　*分流宽度研究*　分流宽度指主槽内取水口上游流入分槽的水流宽度[6],如图6所示(以45°取水口为例)。图中实线为表层水流的分流线,虚线为底层水流的分流线,它们距主槽左岸的距离 $B_s$、$B_b$ 分别为表层分流宽度和底层分流宽度。

分流宽度随取水角度和分流流速比的变化而变化,见图7。当 η 较小时,底部相对分流宽度随 θ 的减小而明显减小,而底部分流宽度的减小会大大减少推移质底沙进入分槽的可能性,因此较小的取水角度对取水防沙是非常有利的。当 η> 10时,底部分流宽度随 η 和 θ 变化均不大。

4.1.2　*分槽断面收缩比研究*　通过对取水近区实测流场的分析可以发现,不同水流条件下分槽左岸均存在一个回流区,该回流区的强度和范围随 η 和水深的变化而有所不同:η 越大,越靠近水体表层,回流区的强度和范围越大。回流区的存在导致分槽内净进流宽度减小,效果类似于分槽断面发生了"收缩",因此将净进流区的宽度 $b'$ 与分槽宽度 $b$(见图8)的比值定义为断面收缩比 ξ,即:

$$\xi = b'/b \tag{6}$$

断面收缩比 ξ 的大小反映了分槽内取水条件的优劣,ξ 越大,表明分槽断面内的净进流宽度越大,回流区的宽度越小,越有利于水流平顺地进入分槽。图9表明,在同样的水流条件下,取水角度越小,取水的分流流速比越大,分槽内的回流区宽度越小,取水条件越好。



© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

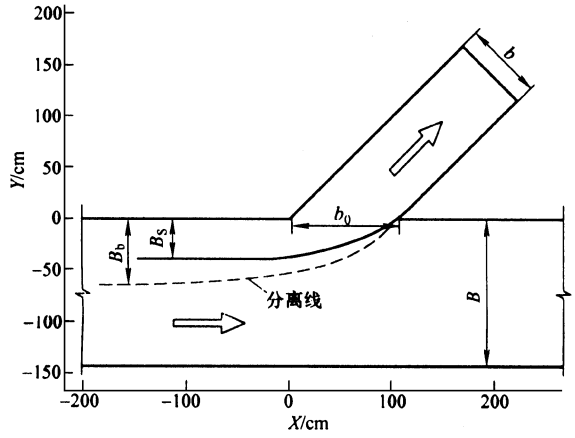



图 6　分流宽度示意

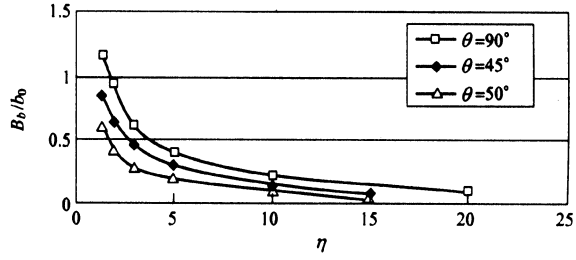



图 7　不同取水角度时底层分流宽度随 η 的变化

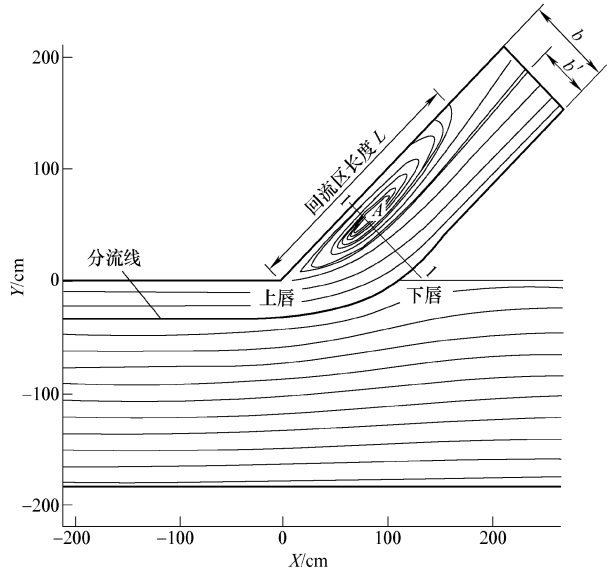



图 8　收缩比示意

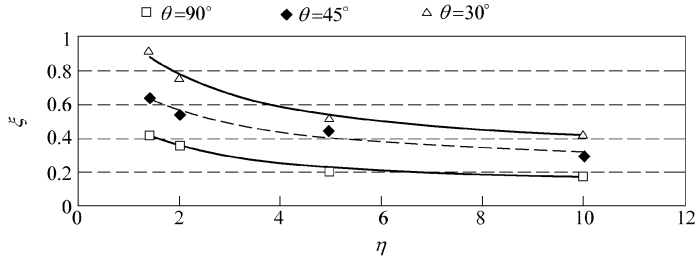



图 9　收缩比随 θ 和 η 的变化



© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

**4.2**　口门断面处的水流特性　取水口的"口门断面"(图2中的1-1断面)是一个流态非常复杂的部位:口门上唇处存在着流线弯曲和分离,下唇处存在着滞流和缓流;水流表层流速高、动量大,底层流速低、紊动强。因此,"口门断面"成为取水分流最敏感的部位,也是本次试验的重点研究对象。

4.2.1　*流场情况*　研究发现,不同于取水口的其他部位,口门断面处的水流结构具有明显的三维特性,见图10。

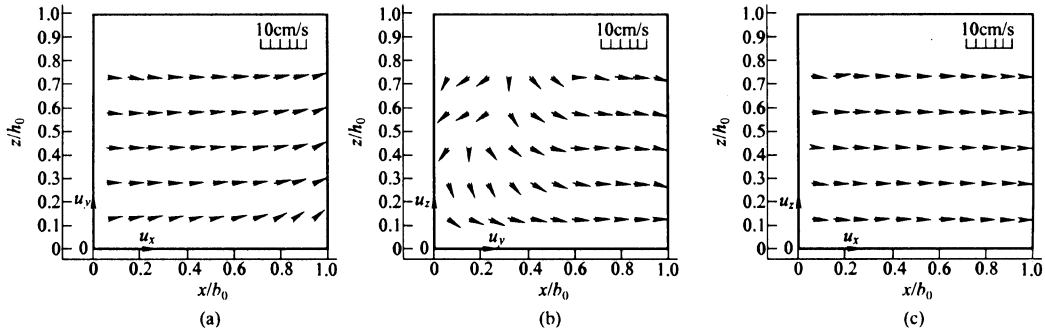



图10　口门断面处的流速分布(θ=45°, η=5)

图中外围为位置坐标,用以描述测点的位置;内部为速度坐标,用以描述该测点处水流质点速度的大小和方向。图10(b)表明,靠近口门上游处 $u_z$ 为负值,即此处存在下潜流,且垂向流速 $u_z$ 与横向流速 $u_y$ 处于同一量级。该图揭示了在口门断面处存在着因取水分流而产生的二次环流。

$u_y$ 是由于分流而引起的速度分量,能够定性地反映口门断面处的取水分流特性。图11中绘出了不同取水角度时,口门断面处 $X-Y$ 流场的情况。

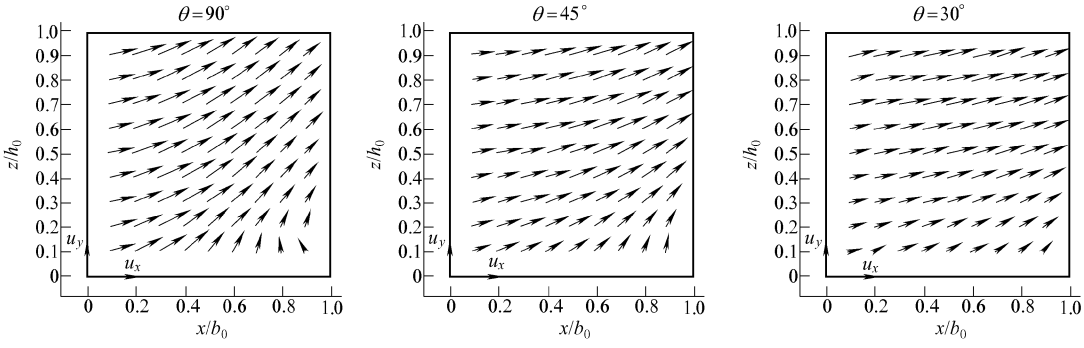



图11　不同θ时口门断面处的$X-Y$流场情况

由图可知,$u_y$ 的较大值发生在口门下游的近底部水域,说明该区域是水流进入口门的主要部位,也是推移质泥沙最易进入分槽的区域;在口门断面上,90°取水口的 $u_y$ 值最大,45°取水口次之,30°取水口最小。较小的 $u_y$ 值会降低推移质泥沙进入口门的机会,因此从取水防沙的角度考虑,较小的取水角度具有更大的优势。

4.2.2　*流速分布的均匀度研究*　为了定量地研究口门断面处流场的均匀性随取水角度的变化,提出流速分布均匀度 $P_{u\theta}$ 的定义:

$$P_{u\theta}=\left[1-\frac{1}{\overline{u_\theta}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(u_{\theta_i}-\overline{u_\theta})^2}{n}}\right]\times 100\% \tag{7}$$

式中:$P_{u\theta}$ 为流速分布的均匀度,$u_\theta=u_x\cos\theta+u_y\sin\theta$ 为 $u_x$ 和 $u_y$ 在取水方向上的合速度;$u_{\theta_i}$ 为各测点处的 $u_\theta$ 值;$\overline{u_\theta}$ 为所有测点处 $u_\theta$ 的平均值。

图12反映了不同取水角度时流速均匀度的变化规律。



© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

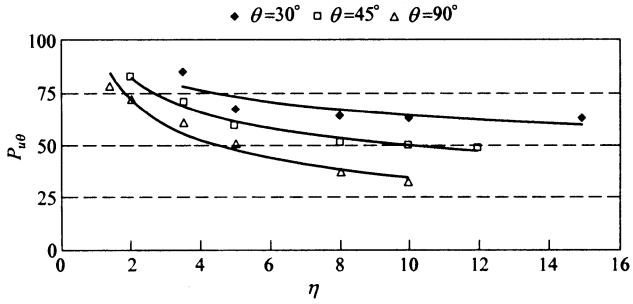



图 12　流速均匀度随θ和η的变化

由图可知,

(1) θ 相同时, 流速均匀度随 η 的增加而减小;

(2) η 相同时, 流速均匀度随取水角度的减小而增大。

以上规律表明, 当其他参数一定时, 较小的取水角度可以引导水流更均匀地进入分槽, 这对于取水防沙是有利的。

## 5　结论

(1) 通过理论分析、水槽试验和数值模拟计算, 对90°、45°和30°取水口的水力特性进行了定量研究。研究结果表明, 对于90°取水口, 其水力特性的显著特点是分槽左岸存在大范围的分离区。分离区的存在导致分槽内的净进流宽度减小, 流速增加。当取水角减小至45°和30°时, 分离区的范围逐渐减小, 取水近区的流线更加平顺, 口门断面内的流速分布也更加均匀。

(2) 通过对不同角度取水口水力特性的对比分析, 总结出了明渠岸边侧向取水的“取水角效应”。试验表明, 随着取水角度的减小, 口门断面的流速分布更加均匀, 口门上游主槽内的相对分流宽度更小, 分槽断面内的净进流宽度更大, 取水近区的流线更加平顺。

(3) 从取水防沙的角度讲, 取水角 θ 较小的取水口具有很多优点:

①θ 越小, 取水口附近的水流条件越好, 口门断面水流的局部阻力系数越小, 水流经过取水口时的水头损失也越小, 这有助于取水效率的提高。

②θ 越小, 推移质底沙越不易进入分槽, 有利于取水防沙。

参　考　文　献:

[1] 陈惠泉, 等. 火/核电厂取水防沙防杂物防污进水问题的研究总报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院水力学所, 2003.

[2] 曹继文. 明渠岸边横向取水的三维水力特性及简易防沙措施试验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.

[3] 杨帆. 明渠岸边侧向45°取水口的水力特性研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, (4): 264–270.

[4] 杨帆, 郭军, 陈惠泉. 明渠岸边侧向取水口的三维数值计算[A]. 水力学与水利信息学进展2007[C]. 南京: 河海大学出版社, 2007.

[5] 曹继文, 陈惠泉, 贺益英. 明渠岸边横向取水口的三维数值计算[J]. 水利学报, 2004, (2): 119–125.

[6] 杨帆. 明渠岸边侧向取水的“取水角效应”研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2007.

(下转第73页)



© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

## Progress of study on theory and method of virtual water

WANG Hong-rui[1], HAN Zhao-xing[2], HAN Lu-jie[1], HE Li-juan[3]
(1. *Institute of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;
2. *School of Environment, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*;
3. *School of Languages and Literatures, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

**Abstract**: Virtual water is an expansion of the real water resources conception in the society. It is one of the hot topics at present. After an introduction of the virtual water and its related concepts, this paper summarizes the progress of studies on the theory and method of virtual water in China and abroad. The status can be generalized as in 5 aspects, i.e., virtual water theory, virtual water trade and food secuity, virtual water strategy, eco- water footprint and quantification of virtual water. The authors foresee some future research topics. It is thought that the expansion of real water resource conception, quantification of virtual water, policy-making based on virtual water theory, eco- water footprint and virtual water trade balance would be the 5 key points of research in future.

**Key words**: virtual water; virtual water trade; virtual water strategy; eco-water footprint

(责任编辑: 王成丽)

(上接第 50 页)

## Study on diversion angle effect on lateral intake flow

YANG Fan
(*Department of Hydraulics, IWHR, Beijing* 100038, *China*)

**Abstract**: The diversion angle effect on lateral intake flow in open channels, which is defined as the diversion angle effect, was studied by means of theoretical analysis, laboratory flume experiment and numerical simulation. It is demonstrated that the variation of the diversion angle has a significant influence on the intake flow characteristics. The study results show that with decreasing of the diversion angle from 90° to 30°, the intake flow is getting more uniform at the entrance section; the relative diversion width of the main flow upstream of the intake is reducing; the net inflow width in the intake is becoming lager; the streamlines are appearing more smooth in the diversion region; and more sediment can be guided away far from the intake.

**Key words**: diversion angle effect; lateral intake flow; sediment control; numerical simulations

(责任编辑: 李福田)



© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net