

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.04.009

等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟

周 舟^{1,2}, 曾 诚^{1,2}, 周 婕³, 王玲玲^{1,2}, 丁少伟^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究不同交汇角度 θ 和流量比 q 对明渠交汇口壅水特性的影响规律, 利用体积函数法 (VOF) 追踪自由表面, 采用雷诺应力模型 (RSM) 封闭控制方程, 建立明渠交汇水流三维数值仿真模型, 对 3 种流量比和 7 种交汇角的 21 种组合工况进行模拟研究, 对交汇口附近的三维壅水形态进行分析。结果表明: 由于支流汇入的顶托作用, 上游区域内水位壅高, 交汇区域内出现水面跌落现象; 同一流量比工况下, 随着交汇角的增大, 上游水位逐渐增大, 下游水面跌落现象越来越剧烈; 对所有工况的上下游最小水深比 h_d^* 和最大水深比 h_m^* 进行计算, 发现在本文研究的流量比及交汇角变化范围内, 上下游最小和最大水深比均随着交汇角的增大而增大, 随着流量比的增加而减小。最后, 对上下游水深比的变化范围进行分析, 得出结论: 同一流量比工况下, 交汇角增大, 交汇口附近水面变幅增大; 同一交汇角度工况下, 流量比增大, 交汇口附近水面变幅减小。

关键词: 明渠交汇口; 河道壅水; 交汇角; 流量比; 数值模拟

中图分类号: TV133.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2020)04-0347-07

Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences

ZHOU Zhou^{1,2}, ZENG Cheng^{1,2}, ZHOU Jie³, WANG Lingling^{1,2}, DING Shaowei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the impact of different junction angles and discharge ratios on the backwater characteristics at open-channel confluences, a three-dimensional numerical model was established by using the Volume of Fluid (VOF) method for the free surface capture and adopting the Reynolds Stress Model (RSM) for the governing equations closure. The 3D pattern of backwater was analyzed after the simulations of 21 combined conditions for 3 different discharge ratios and 7 different junction angles. The results indicate the raising of water level in the upstream area and the dropping of water level in the junction area because of the tributary convergence. Under a same discharge ratio, the upstream water level increases as the junction angle increases, and the drop of the water surface in the downstream becomes more obvious. The minimum and maximum ratios of the upstream water depth to downstream water depth were calculated, which indicate that both the minimum and maximum depth ratios increase with a greater junction angle or a smaller discharge ratio among the ranges of junction angle and

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405605); 中央高校基本科研业务费专项(B200202116, 20185044412); 国家自然科学基金(51879086); 高等学校学科创新引智计划(B17015)
作者简介: 周舟(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算水力学研究。E-mail: zhou. z. work@live. com
通信作者: 曾诚, 副教授。E-mail: c. zeng@foxmail. com
引用本文: 周舟, 曾诚, 周婕, 等. 等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 347-353.
ZHOU Zhou, ZENG Cheng, ZHOU Jie, et al. Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 347-353.

discharge ratio in the current study. The variation range of the depth ratio was also analyzed. Under a same discharge ratio, a greater junction angle leads to a larger variation range of water level around the junction area. Under a same junction angle, a greater discharge ratio leads to a smaller variation range of water level around the junction area.

Key words: open-channel junction; backwater; junction angle; discharge ratio; numerical simulation

明渠水流交汇现象广泛存在于灌溉和引排水工程中。在明渠交汇口处,水流结构复杂、水力特性独特。明渠交汇口水力特性研究对城市内涝治理、河口冲淤预测、污染物输移控制等诸多工程领域都具有重要意义。国内外学者针对明渠交汇流进行了大量研究。Taylor^[1]对渠道水流交汇现象进行了理论分析与试验研究,认为上下游水面线的变化与支流流量比、交汇角等因素有关。Ramamurthy^[2]通过假定交汇明渠的上下游水深比,初步建立了能够描述水流交汇区域水力特征的理论模型。Hager^[3]基于水槽模型试验观测,对交汇水流上下游水深比与众多水力要素的关系进行探讨并得出结论:流量比与交汇角是影响上游壅水高度的主要因素。Hsu等^[4]通过物理试验研究,得到正交工况下上游水位壅高值与流量比之间的关系。茅泽育等^[5]通过对交汇区域上下游水深影响要素的假设,得到水深比与流量比、弗劳德数、交汇角度等水流要素之间的理论关系,在后续的数值研究^[6-7]中,研究者从能量、动量输运等角度详细分析了水面线变化与水流结构之间的关系。王晓刚等^[8]针对Y型汇流口建立一维数学模型,探究流量、交汇角等影响因素对汇流口水深的影响规律。刘同宦等^[9]通过90°水槽物理试验,研究分析不同流量比下时均流速分布与交汇口下游水面线变动之间的关系。Zeng等^[10]通过构建RANS-LES混合模型,提出能够准确捕捉明渠交汇区域自由液面的数值方法。Yuan等^[11]对正交明渠水流的水动力场进行详细的物理测量,得到流速、应力、紊动能等水力要素的数据及其分布情况。

本文采用RSM模型封闭控制方程,利用体积函数法(VOF)追踪自由表面,建立三维数值模型,对等宽明渠交汇口的壅水问题进行数值模拟研究。通过对不同交汇角和流量比工况的计算,分析交汇角和流量比对交汇口附近水面变化的影响,探究交汇角和流量比与交汇口上下游水深比之间的关系,为渠道工程设计与实践提供参考。

1 数值模型

1.1 控制方程

计算区域内水流运动满足动量方程和质量守恒方程:

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right)$$

(1)

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

(2)

式中: i, j ——坐标方向的参数, $i, j = 1, 2, 3$ 分别对应 x, y, z 坐标方向; x_i, x_j —— i, j 方向的笛卡尔坐标; u_i, u_j —— i, j 方向的时均流速; t ——时间; ρ ——流体密度; p ——压强; μ ——动力黏性系数; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ ——雷诺应力。

1.2 雷诺应力模型

雷诺应力模型(RSM)通过直接求解雷诺应力输运方程计算雷诺应力。相比于涡黏模型,摆脱了各向同性涡黏性假设的限制,能够反映更多的湍流物理机理,因而在工程领域具有其他紊流模型不可比拟的优势。

Reynolds 应力输运方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u_k u'_i u'_j}) = & - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{u'_i u'_j u'_k} + \frac{1}{\rho} (\overline{p' u'_i \delta_{kj}} + \overline{p' u'_j \delta_{ik}}) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] + P_{ij} + \varphi_{ij} + \varepsilon_{ij} \end{aligned}$$

(3)

其中

$$P_{ij} = \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad \varphi_{ij} = \frac{1}{\rho} \overline{p' \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)} \quad \varepsilon_{ij} = -2\nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}$$

式中: ν ——流体动力黏度。其余符号含义见文献[6]。

1.3 体积函数法

采用 VOF 对自由液面进行模拟。在网格单元中,设定水的体积为 V_w ,网格单元的体积为 V_c ,水的体积分数 a_w 满足:

$$a_w = \frac{V_w}{V_c} \tag{4}$$

$a_w=1$,表示网格单元内全部为水; $a_w=0$,表示网格内全为空气; $0 < a_w < 1$,代表该网格单元内存在着自由液面。 a_w 满足以下输运方程:

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (a_w u_i) = 0 \tag{5}$$

通过对 a_w 迭代求解,可根据式(6)进一步确定网格单元内其他的特性参数。

$$\varphi = a_w \varphi_w + (1 - a_w) \varphi_a \tag{6}$$

式中: φ ——网格内其他参数,如密度、分子黏性系数等(下标 w 表示水, a 表示空气)。

1.4 数值方法及边界条件

采用有限体积法对控制方程进行离散,速度与压力解耦采用 PISO 算法,其他项离散均采用 QUICK 格式。计算边界如图 1 所示,主渠与支渠入口均为速度进口,流速方向垂直于进口断面;下游出口为压力出口,尾水位高度与实测值一致,出口压力满足静水压强分布,液面相对压强为 0;壁面边界忽略粗糙度影响,采用无滑移标准壁面函数法对近壁区流动进行模拟。

1.5 计算区域

本文研究对象为矩形断面的等宽明渠交汇口,交汇角 θ 变化范围为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。参考 Weber 等^[12]的物理模型,选取渠宽 $W=0.914\text{ m}$,渠道高度为 0.509 m 。为使主渠和支渠内水流到达汇流区时充分发展,选取主渠长度为 $18.28\text{ m}(20W)$,支渠长度为 $9.14\text{ m}(10W)$ 。支渠距离主渠入口 $9.14\text{ m}(10W)$ 。图 1 所示为交汇角 $\theta=90^\circ$ 工况的计算区域, x,y,z 轴正方向如图所示,坐标原点位于支渠入口上游侧渠底。

采用六面体和四面体网格对计算区域进行剖分。 x,y,z 方向均采用非均匀网格, x,y 方向上对交汇区域和近壁区域进行加密, z 方向上对液相域和近壁区域进行加密。对于本文所涉及的 7 种交汇角工况(30° 、 45° 、 60° 、 65° 、 75° 、 85° 和 90°),经网格无关性验证,确定网格数在 31 万(90° 工况)~ 36 万(30° 工况)之间。

2 模型验证

选取 90° 等宽明渠交汇水流试验的实测数据^[12]对模型进行率定。验证工况中,主渠上游流量 $Q_u = 0.042\text{ m}^3/\text{s}$,支渠上游流量 $Q_b = 0.127\text{ m}^3/\text{s}$,流量比 $q = Q_u / (Q_u + Q_b) = 0.25$,其中下游出口流量 $Q_d = Q_u + Q_b$,下游水位为 0.31 m 。图 2 为交汇区附近沿程水面线计算结果,图 3 为交汇区下游各测点的流速剖面,图中将此次 RSM 计算结果与实测数据和文献[13]中的 $k-\varepsilon$ 模型计算结果进行了比较。对图 2 中的坐标变量无量纲化($X^* = x/W, Y^* = y/W, Z^* = z/W$), $u^* = u/U_d, v^* = v/U_d, w^* = w/U_d, U_d$ 为尾水断面平均流速。

由图 2 可见,在水面线结果对比方面,RSM 计算结果对交汇区附近水位壅高与跌落特征捕捉准确;与 $k-\varepsilon$ 模型计算结果相比,RSM 不仅能够更准确地模拟上下游水位,并且在水位变化剧烈的区域也能精确地捕捉水位的迅速跌落和缓慢抬升。由图 3 可见,在速度剖面对比方面,RSM 计算结果与实测值吻合较好,与 $k-\varepsilon$ 模型计算结果大体一致,未体现出明显的模型优势。综上所述,就本次模型验证而言,与 $k-\varepsilon$ 模型计算结果相比,RSM 在水面线计算精度方面具有明显优势,在速度剖面计算精度方面没有明显改善。

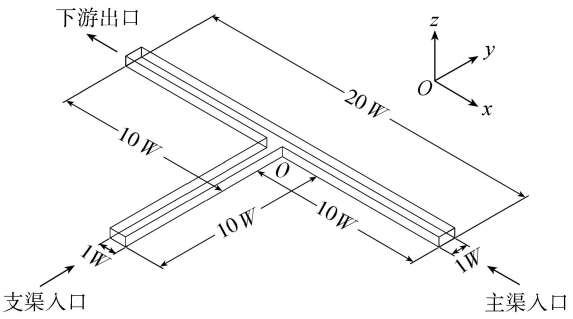


图 1 计算区域示意图 ($\theta=90^\circ$ 工况)
Fig.1 Schematic of the calculation area ($\theta=90^\circ$)

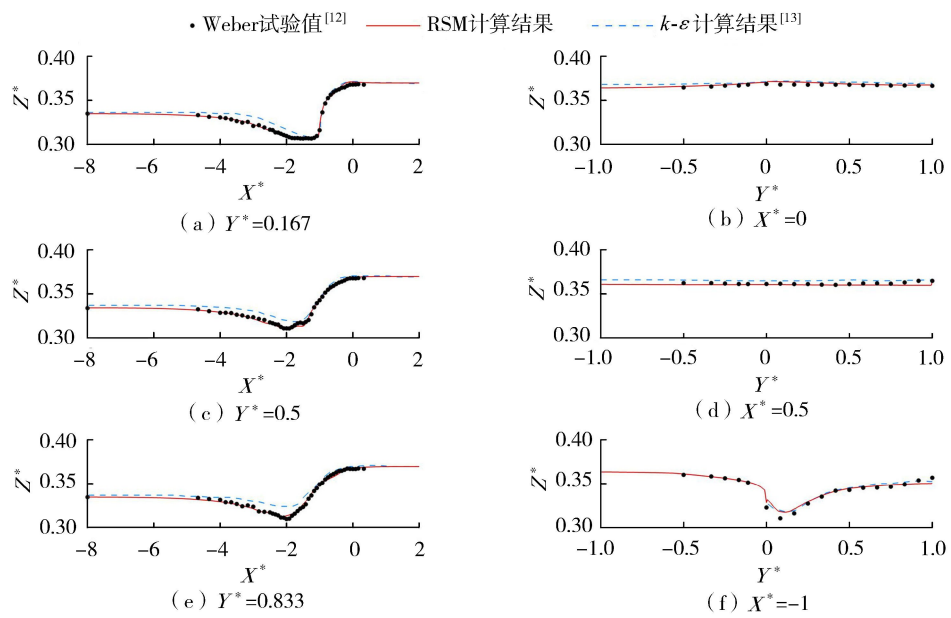


图2 自由液面计算结果对比
Fig.2 Comparison of free surface profiles

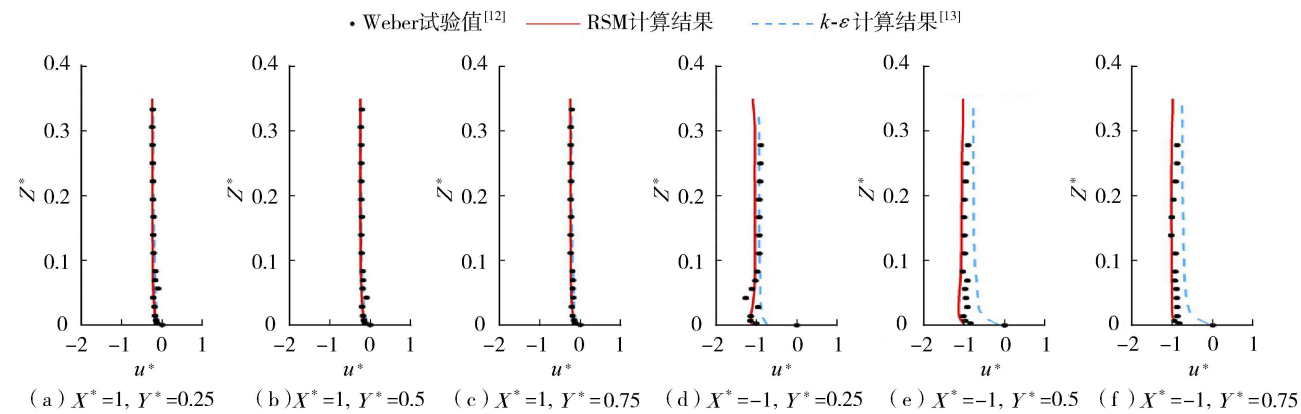


图3 交汇区下游测点流速剖面对比
Fig.3 Comparison of streamwise velocity profiles

3 等宽明渠交汇口壅水特性分析

3.1 数值模拟工况

在对模型充分率定的基础上,对3种流量比($q = Q_u/Q_d = 0.25、0.417$ 和 0.75)和7种交汇角($\theta = 30^\circ、45^\circ、60^\circ、65^\circ、75^\circ、85^\circ$ 和 90°)的21个组合工况进行计算。为比较不同流量比和交汇角对明渠交汇口的壅水影响,各工况的下游流量和下游水位均分别为 $0.17\text{ m}^3/\text{s}$ 和 0.31 m 。

3.2 结果分析和讨论

为对计算结果进行分析,定义主渠上游水深 h_u 、支渠上游水深 h_b 和交汇口下游水深 h_d 分别为断面 AB 、 CD 和 EF 处水深,3个断面距离坐标原点 O 的平面距离分别为 $2W、2W$ 和 $8W$,断面位置如图4所示。由图2可见,各特征水深在其相应断面位置已达到稳定。

3.2.1 上游水深比分析

定义上游水深比 $h_u^* = h_u/h_b$ 。图5为 h_u^* 的计算结果。就流量比的影响而言:当 $q = 0.25$ 时, h_u^* 均大于1;当 $q = 0.75$ 时, h_u^* 均小于1;当 $q = 0.417$ 时, h_u^* 的值在大流量比工况和小流量比工

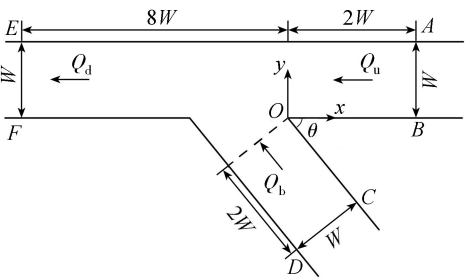


图4 断面位置示意图
Fig.4 Locations of selected sections

况之间,更接近于 1。结果表明流量比越小(Q_u 越小, Q_b 越大),则在交汇区域中主渠水流受到支渠水体的挤压越大,导致主渠上游壅水现象越明显。就交汇角的影响而言,当交汇角较小时($\theta = 30^\circ$ 和 $\theta = 45^\circ$), h_u^* 的值更接近 1,表明交汇角越小,则主渠上游水深和支渠上游水深越接近。

对于本次计算的 21 个工况而言, h_u 和 h_b 均很接近, h_u^* 的变化范围在 2% 以内。由于主渠和支渠的上游水深近似相等,在后续讨论中,均取主渠上游水位 h_u 来讨论交汇区的壅水影响。

3.2.2 壅水形态分析

图 6 和图 7 分别为流量比 $q = 0.25$ 时,不同交汇角 (30° 、 45° 、 60° 、 90°) 工况下的三维水位云图和沿程水面线分布。由图 6 可见,由于支流汇入的顶托作用,上游壅水区形成明显的水位壅高,汇流区和集流区域内出现水面跌落现象。随着交汇角 θ 逐渐增大,支流入汇引入 y 方向的水流动量增大,对主渠上游来流的顶托作用增加,汇流区域和集流区域中水面跌落的范围增大,水面跌落现象更明显。由图 7 所示的沿程水面线分布可见,随着交汇角增大,上游水位逐渐增大,下游最小水深逐渐减小。其他流量比工况下,不同交汇角对明渠交汇口壅水形态的影响大体类似。

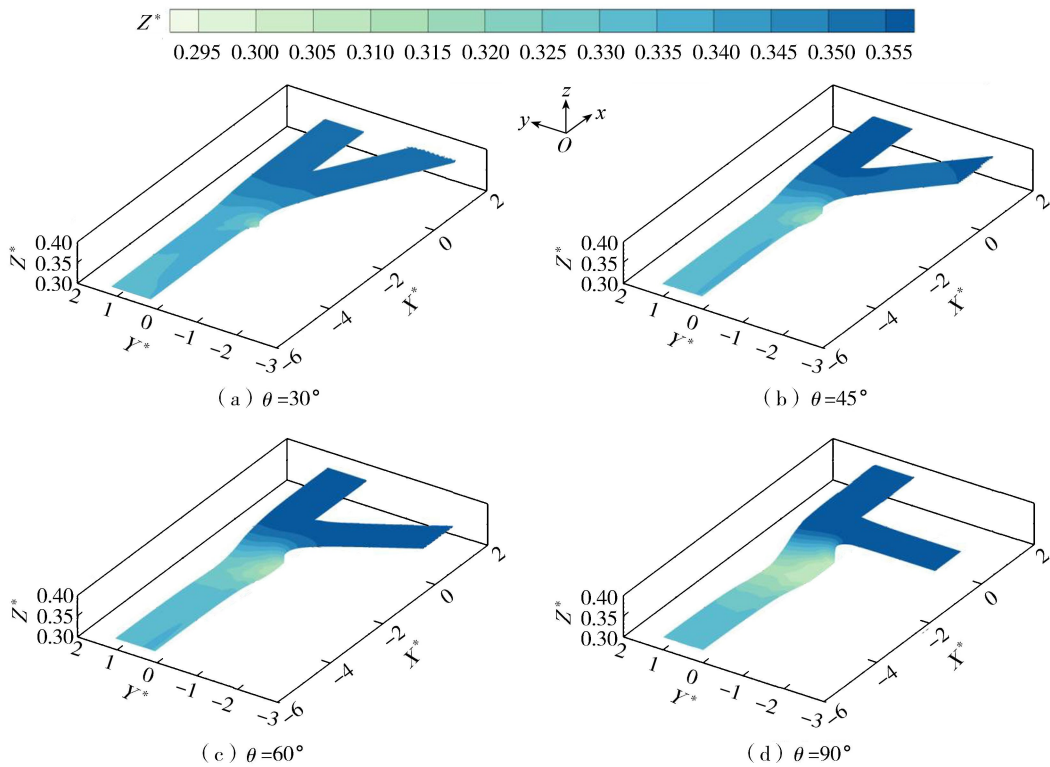


图 6 不同交汇角工况下的三维水位云图
Fig. 6 3D water-level contours for different junction angles

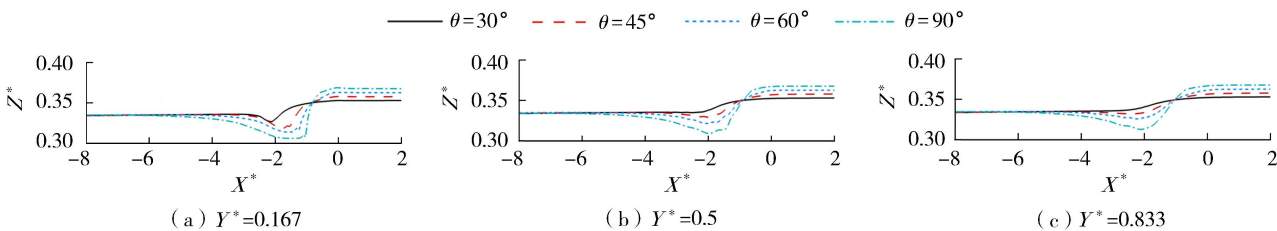


图 7 不同交汇角对自由液面的影响
Fig. 7 Impact of different junction angles on free surface

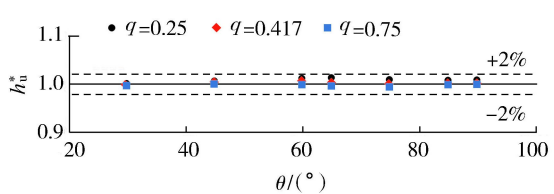


图 5 上游水深比 h_u^* 计算结果
Fig. 5 Results of upstream depth ratio h_u^*

3.2.3 上下游水深比和最大水深比分析

为进一步分析交汇角和流量比对等宽明渠交汇口附近水面壅高和跌落的影响,对于21个组合工况的上下游最小水深比 h_d^* 和上下游最大水深比 h_m^* 进行计算。 h_d^* 和 h_m^* 的定义如下(h_d^* 反映了明渠交汇口对上下游水深的影

$$h_d^* = \frac{h_u}{h_d}$$

(7)

$$h_m^* = \frac{h_u}{h_m}$$

(8)

式中: h_m ——交汇口水面跌落区域内的最小水深。

图8为3种流量比条件下,7种交汇角工况 h_d^* 和 h_m^* 的计算结果,以及 h_d^* 和 h_m^* 随 θ 变化的拟合曲线。由图8可见,3种流量比工况中, h_d^* 与 h_m^* 均随着交汇角 θ 的增大而增大;当交汇角度保持不变时, h_d^* 与 h_m^* 随着流量比 q 的增加而减小。这意味着,随着交汇角度的增加或者流量比的减小:一方面,交汇口上游水流受支渠来流的挤压作用增大,上游水位增大,河口壅水现象越明显;另一方面,下游最低水位与上游水位之间的落差增大,交汇口局部水面线的变动越显著,表明水流的紊动强度增加,水体及河道边壁的能量交换将更剧烈。

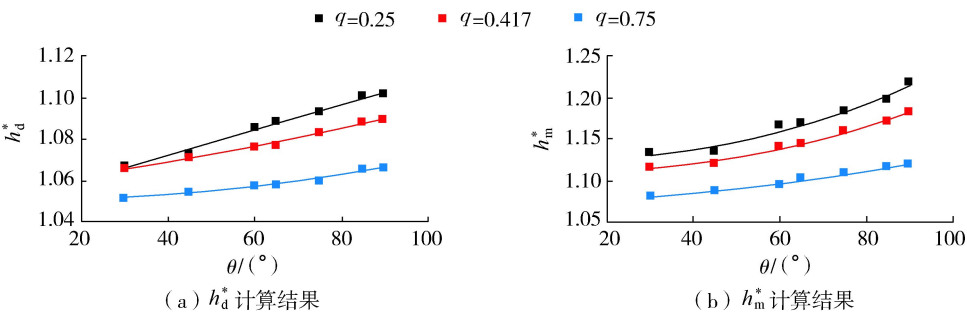


图8 h_d^* 和 h_m^* 计算结果
Fig.8 Calculation results of h_d^* and h_m^*

3.2.4 上下游水深比变化范围分析

在图9中, h_d^* 与 h_m^* 之间的阴影区域表示3个流量比工况中计算区域内任一点上下游水深比的变动范围,即当 $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 并且 q 为某一特定值时,上游水位与下游任一点水位的比值将落于 h_d^* 与 h_m^* 二者之间。例如,当 $q = 0.25$ 且 $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 时,明渠交汇口上下游水位比的变化范围为1.06~1.22。由9图可见,同一流量比工况下,随着流量比的增大,上下游水深比的变化范围明显增大,说明交汇口附近水面变幅增大;同一交汇角度工况下,随着流量比的增大,上下游水深比的变化范围明显减小,说明交汇口附近水面变幅减小。

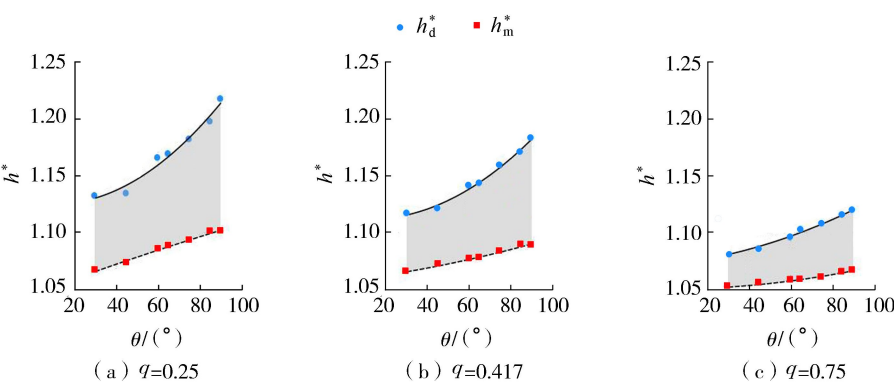


图9 上下游水深比范围
Fig.9 Variation range of the upstream-to-downstream depth ratios

4 结 论

- a. 通过与原型物理模型测量数据的比较,发现在明渠交汇口附近水面线计算精度方面,RSM 的表现优于 $k-\varepsilon$ 模型。
- b. 主渠和支渠的上游水深近似相等,相对误差不超过 2%。
- c. 对明渠交汇口附近三维壅水形态进行分析,由于支流汇入的顶托作用,上游壅水区内形成明显的水位壅高,汇流区和集流区域内出现水面跌落现象。同一流量比工况下,随着交汇角的增大,上游水位逐渐增大,下游最小水深逐渐减小。
- d. 计算得到所有工况的上下游最小水深比和最大水深比。在本文研究的流量比及交汇角变化范围内,上下游最小水深比和最大水深比均随交汇角的增大而增大,随着流量比的增加而减小。
- e. 对上下游水深比的变动范围进行分析。同一流量比工况下,随着交汇角的增大,上下游水深比的变化范围明显增大,交汇口附近水面变幅增大;同一交汇角度工况下,随着流量比的增大,上下游水深比的变化范围明显减小,交汇口附近水面变幅减小。

参考文献:

[1] TAYLOR E H. Flow characteristics at open-channel junctions[J]. American Society of Civil Engineers Transactions, 1944, 109: 893-902.

[2] RAMAMURTHY A S. Combining open channel flow at right angled junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114 (12): 1449-1460.

[3] HAGER W H. Transitional flow in channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115(2): 243-259.

[4] HSU C, WU F, LEE W. Flow at 90° equal-width open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(2): 186-191.

[5] 茅泽育, 赵升伟, 张磊,等. 明渠交汇口三维水力特性试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 1-7. (MAO Zeyu, ZHAO Shengwei, ZHANG Lei, et al. Experimental study on 3D flow characteristics at the confluence of open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 1-7. (in Chinese))

[6] 茅泽育, 赵雪峰, 许昕,等. 交汇水流三维数值模型[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(5): 800-805. (MAO Zeyu, ZHAO Xuefeng, XU Xin, et al. 3D numerical model for confluence flow[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(5): 800-805. (in Chinese))

[7] 茅泽育, 赵升伟, 罗昇,等. 明渠交汇口水流分离区研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 7-12. (MAO Zeyu, ZHAO Shengwei, LUO Sheng, et al. Study on the seperation zone in open-channel junction[J]. Advances in Water Science, 2005, 16 (1): 7-12. (in Chinese))

[8] 王晓刚, 严忠民. Y 型汇流口壅水规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 185-188. (WANG Xiaogang, YAN Zhongmin. Pattern of backwater at a Y-shaped junction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(2): 185-188. (in Chinese))

[9] 刘同宦, 郭炜, 詹磊. 90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 485-489. (LIU Tonghuan, GUO Wei, ZHAN Lei. Experimental study of the velocity profile at 90°open channel confluence[J]. 2009, 20(4): 485-489. (in Chinese))

[10] ZENG Cheng, LI Chiwai. A hybrid RANS-LES model for combining flows in open-channel T-junctions [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2010, 22(5): 154-159.

[11] YUAN Saiyu,TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Turbulent flow structure at a 90-degree open channel confluence: accounting for the distortion of the shear layer[J]. Journal of Hydro-Environment Research,2016, 12: 130-147.

[12] WEBER L J, SCHUMATE E D, MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 340-350.

[13] 周晶. 明渠交汇水流三维数值模拟[D]. 广州:中山大学, 2010.