

弯道斜向入流对单孔水闸水力特性的影响

张涛涛^{1,2}, 徐林万², 肖 洋^{1,2,3,4,5}, 高 杰², 袁 康², 田 帅⁶

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院; 2. 河海大学水利水电学院;
3. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室; 4. 河海大学长江保护与绿色发展研究院;
5. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 6. 扬州市勘测设计研究院有限公司)

摘要:为揭示弯道斜向入流对单孔水闸水力特性的影响机制,以淮河入海水道二河枢纽水闸为例,构建三维水动力数值模型,模拟并分析了 30°、45°、60°、75°入流角度下的闸前流场结构及水位变化规律,建立了考虑入流角度、弗劳德数和宽深比等因素影响的斜向入流水闸综合流量系数计算公式。结果表明:纵向流速“凹岸小、凸岸大”的分布特征随入流角度的增大而更加显著,入流角度为 30°~75°时弯道出口断面凹、凸岸流速差占断面平均流速的比例由 16.5%最高增至 84.3%;不同流量情况下断面环流强度随入流角度的变化存在差异;弯道出口断面水位呈现凹岸高、凸岸低的横向分布,入流角度为 30°~75°时凹、凸岸水位差占断面平均水位的比例由 1.3%最高增至 30.7%,水流惯性对环流的抑制作用随入流角度增大而降低;在同流量条件下,水闸综合流量系数随入流角度增加呈递减趋势,建立的水闸综合流量系数计算公式得出的值与实际值的平均相对误差为 2.01%,总体精度较高。

关键词:单孔水闸;斜向入流;水力特性;流量系数;弯道

中图分类号:TV131.4 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2026)05-0088-08

Effect of oblique inflow at bends on hydraulic characteristics of a single-orifice sluice//Zhang Taotao^{1,2}, Xu Linwan², Xiao Yang^{1,2,3,4,5}, Gao Jie², Yuan Kang², Tian Shuai⁶ (1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Hydrodynamic System, Ministry of Water Resources, Hohai University; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University; 5. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 6. Yangzhou Survey and Design Institute Co., Ltd.)

Abstract: To reveal the mechanism by which oblique inflow at bends affects the hydraulic characteristics of a single-orifice sluice, a three-dimensional hydrodynamic numerical model is constructed using the Erhe Hub Sluice on the Huaihe River Seaward Waterway as a case study. The flow field structure and water level variation patterns upstream of the sluice are simulated and analyzed under inflow angles of 30°, 45°, 60°, and 75°. A formula for calculating the comprehensive discharge coefficient of the sluice under oblique inflow conditions is established, considering factors such as inflow angle, Froude number, and width-to-depth ratio. The results indicate that the longitudinal velocity distribution pattern of lower velocities on the concave bank and higher velocities on the convex bank intensifies with increasing inflow angle. When the inflow angle ranges from 30° to 75°, the ratio of the velocity difference between the concave and convex banks to the mean cross-sectional velocity at the bend outlet increases from 16.5% to a maximum of 84.3%. The variation of cross-sectional circulation intensity with inflow angle differs under different discharge conditions. The water level at the bend outlet cross-section exhibits a lateral distribution with higher levels on the concave bank and lower levels on the convex bank. When the inflow angle ranges from 30° to 75°, the ratio of the water level difference between the concave and convex banks to the mean cross-sectional water level increases from 1.3% to a maximum of 30.7%, and the inhibitory effect of flow inertia on circulation decreases with increasing inflow angle. Under identical discharge conditions, the comprehensive discharge coefficient of the sluice decreases with increasing inflow angle. The average relative error between the actual values and the values calculated from the established formula for the comprehensive discharge coefficient of the sluice is 2.01%, demonstrating generally high accuracy.

Key words: single-orifice sluice; oblique inflow; hydraulic characteristics; flow coefficients; bends

基金项目:国家自然科学基金项目(52309102,52379075);国家自然科学基金长江联合基金项目(U2240209);水利部重大科技项目(SKS-2022124)

作者简介:张涛涛(1992—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:ztt714521@163.com

为确保流域防洪安全、水资源供给和生态健康,我国已建成数十万座水闸,这些水闸在历年水安全实践中发挥了坚实的保障作用^[1]。在自然河道或人工渠道中,水闸常因上游河道弯曲而面临斜向入流情况,这种非正向入流模式易引发闸前流态紊乱、横向流速分量增大及局部旋涡等现象^[2-3],导致使用传统正向入流理论计算的泄流量与实际产生偏差,严重影响水闸泄流能力和工程安全。

针对斜向入流对水闸水力特性的影响,国内外学者开展了大量研究。水闸斜向入流可以分成两种情况:一种是水闸自身倾斜布置,即上游河道与来流相对平顺,但为提高过流能力或考虑与下游河道平顺衔接^[4],将水闸斜交布置;另一种是水闸轴线与河道正交,但受上游河道形态影响,导致闸前入流与水闸轴线斜交。针对第一种情况,Tuyen^[5]通过物理模型试验发现,斜交堰有效长度随倾角增大显著增加,而流量系数略有下降,综合作用下泄流能力提升,淹没出流时能量损失较大;王仕筠^[6]提出了考虑堰高与交角关系的流量系数公式,指出斜交堰行近流速水头更大,交角减小会加剧水舌干扰,从而降低流量系数;扈霖等^[4]的水槽试验结果表明,斜交实用堰的行近流速随流量和交角的增大而提高,主流在堰前偏转但未形成回流区,并建立了流量系数计算公式。侧堰是斜交堰的一种极端情况,部分学者也开展了相关研究。例如:王佳伟等^[7-8]通过原型观测与数值模拟提出了矩形薄壁侧堰半经验流量公式;迟颖等^[9-10]指出侧向进流会降低溢洪道泄流能力;Vatankhah^[11]基于恒定比能假设建立了梯形渠道侧堰水面线的椭圆积分预测模型;Azimi 等^[12]采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型与 VOF 方法,揭示了圆形渠道侧堰中分流面由底部向水面扩展的规律。对于上游弯道导致斜向入流的情形,目前直接针对闸前斜向入流水力特性的研究仍相对有限,已有成果多集中于弯道水力学特性。例如:戴文鸿等^[13]对弯道内纵向流速分布与横向环流结构进行了总结,指出水流进入弯道后凸岸流速增大、凹岸流速减小,并形成表层流向凹岸、底层流向凸岸的环流结构;熊毅等^[14]分析表明弯道会导致龙口流速分布不均。近年来,部分学者开始关注弯道下游衔接水闸的流动结构调整及水力响应特征。例如:许东明^[15]通过物理模型试验,研究了弯道河流对泄洪闸过流能力的影响,发现弯道离心力作用导致凸岸闸孔过流能力显著降低,并提出了缓解离心力效应、提升整体泄流能力的闸室布置优化方案;于佳敏^[16]针对铜城闸上游三岔河口弯道引发的进流偏斜与大角度偏流问题,结合数值模拟与物理模型试验,系统比较了翼墙优化、闸前

底坎及弯道抛石等整流措施的效果,表明在弯道区域设置抛石可有效抑制分流与拖曳作用,改善进流流态并减轻凹岸冲刷。

综上所述,现有研究主要针对斜交堰、侧堰等几何倾斜堰体的斜向入流特性,而对于弯道斜向入流条件下水闸水力特性和泄流规律的认识仍相对有限。本文以淮河入海水道二期工程的二河枢纽水闸为研究对象,采用数值模拟方法,考虑不同弯道入流角度,对闸前弯道内的流态、水位变化以及水闸综合流量系数公式开展研究,以期为二河枢纽水闸的泄流能力复核提供支撑,同时为类似水闸枢纽的设计和优化提供参考。

1 工程概况

二河枢纽地处淮河入海水道与淮沭新河交汇处,作为淮河入海水道二期工程的首级枢纽及洪泽湖核心行洪口门,其泄流能力直接关系到淮河-洪泽湖系统的防洪安全、水资源配置与生态保护。二河枢纽布置如图 1 所示,枢纽上游河道存在天然弯道,原二河闸共设 35 孔(单孔净宽 10.0 m),闸室总宽 402.0 m,闸底板高程 8.0 m,设计泄洪能力为 5270 m³/s。为扩大淮河下游洪水出路并提高洪泽湖防洪标准,新建 18 孔二河越闸(单孔净宽 10.0 m),闸底板高程 8.0 m,扩建后枢纽总设计流量、校核流量分别达 1.0 万、1.3 万 m³/s。

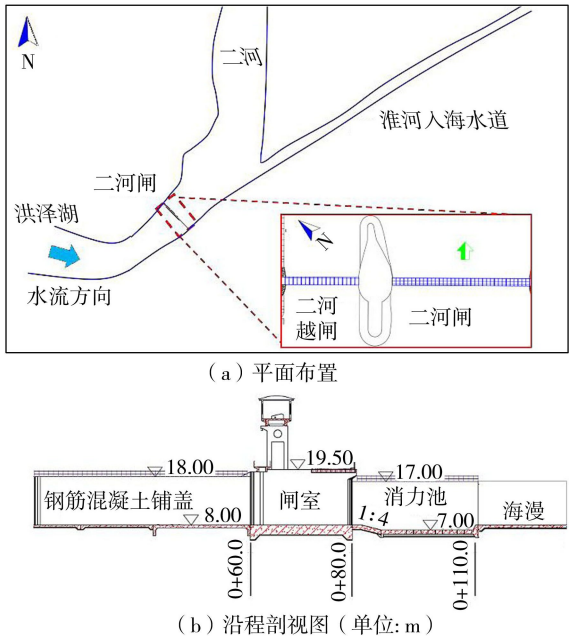


图 1 二河枢纽布置示意图

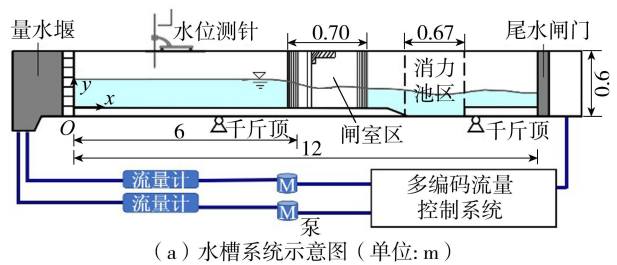
2 研究方法

二河枢纽水闸为多孔闸结构,各闸孔结构对称,运行工况一致,入流方向一致,流态具有高度相似

性,单孔水闸的研究可为整个枢纽提供参考。基于此共性特征,本文以二河枢纽的单孔水闸为研究对象,主要通过数值模拟开展研究,其中数学模型通过物理模型试验结果进行验证。

2.1 物理模型

本次试验以洪泽湖下游二河闸为原型,基于单孔闸门全开、正向进水条件下的实际运行工况建立物理模型。该模型为正态模型,按重力相似准则设计,几何比尺为30。将单孔水闸置于长、宽、高分别为12、0.6、0.6 m的水槽中,闸前过渡段长6.0 m,闸室段长0.7 m,消力池段长0.67 m,水槽系统示意图如图2(a)所示。水闸模型模拟一个完整闸孔(含净宽及两侧半个闸墩厚度),闸孔净宽33.3 cm,两侧半个闸墩厚度均为3.3 cm,如图2(b)所示。水槽进口处设置整流装置,确保水流均匀。流量、水位和断面中心线的流速分别由西门子管道电磁流量计、水位测针、旋桨流速仪测定。闸门上游和下游各设1个流速仪。闸室、过渡段、消力池区各设1个水位测针。



(b) 水闸模型实物图
图2 物理模型示意图

2.2 数学模型

本文采用 Fluent 软件建立三维水动力数值模型,采用雷诺应力模型(RSM)封闭湍流项,并结合VOF方法追踪自由水面,模拟不同入流角度下的水流运动过程。

2.2.1 计算区域和网格划分

选取单个闸门进行建模分析,计算区域如图3所示,x轴为顺水流方向,y轴为横向,z轴为垂向。模型边界为:底部、左右边壁设为壁面,上游设为流量边界,下游设为水位边界。考虑计算精度,为精确

捕捉自由液面,对闸室与消力池区域进行网格加密,如图3所示。采用六面体网格划分区域,近壁区边界层增长因子为1.2。为进行网格无关性验证,采用3种不同网格尺寸的模型进行模拟计算,分别为A类(网格尺寸为0.2 m)、B类(网格尺寸为0.2~0.4 m)和C类(网格尺寸为0.2~0.5 m)。图4展示了不同网格尺寸情况下沿程中心线流速分布计算结果,可以看出,3种网格尺寸下计算结果差异较小。考虑计算资源和效率,采用C类网格,最小网格边长为0.2 m,最大网格边长为0.5 m,总网格数约56万。

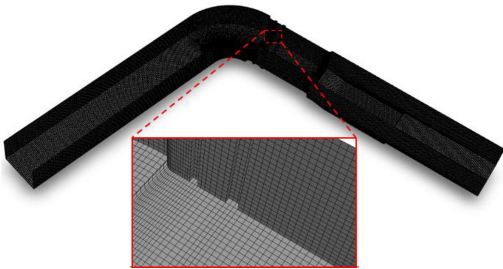


图3 计算区域网格

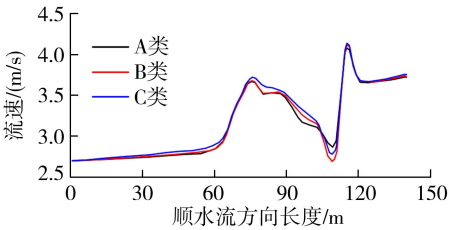


图4 不同网格尺寸下x方向流速分布

2.2.2 数学模型验证

采用20年一遇流量工况(单孔闸实际泄流量为56.60 m³/s,下边界水位为1.572 m,按照几何比尺缩放后进行试验)水槽试验结果对数学模型进行验证。将水槽试验数据缩尺换算为原型数据后,与数值模拟沿程水位和断面中心流速进行对比,结果如图5所示。由图5可知,模拟水位与试验值吻合程度较高,最大误差不超过0.08 m,模拟流速分布与试验结果较为一致,最大误差不超过0.13 m/s,平均相对误差为2.5%,验证效果满足JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的要求。模型纵向依次布设60 m长的混凝土铺盖、20 m长的闸室、30 m长的消力池和30 m长的海漫。沿程流速存在两个峰值,分别位于消力池入口处和消力池尾坎处,后者流速较大,主要是由于消力池尾部存在1 m高的尾坎,此处发生水跌,水位较消力池入口处低,过流面积缩减3 m²,故峰值流速大。

2.3 工况设置

根据二河枢纽水闸的进流特点,设计5个入流角度和4个流量级别,共20个工况。入流角度包括 $\theta=0^\circ、30^\circ、45^\circ、60^\circ、75^\circ$,流量级别包括300年一遇

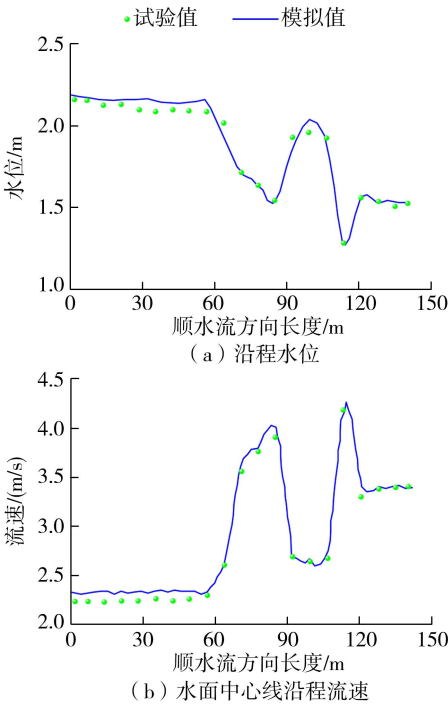


图5 数值模拟与水槽试验结果对比

($Q = 188.68 \text{ m}^3/\text{s}$, 设计洪水流量)、100 年一遇 ($Q = 132.08 \text{ m}^3/\text{s}$)、50 年一遇 ($Q = 94.34 \text{ m}^3/\text{s}$)、20 年一遇 ($Q = 56.60 \text{ m}^3/\text{s}$), 流量均为单孔水闸的泄流量, 具体工况设置见表 1。在上游来流弯道段, 按照角度均匀布置 4 个监测断面: C1、C2、C3、C4, 如图 6 所示。

表 1 工况设置

工况	$\theta/^\circ$	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	下游水位/m	工况	$\theta/^\circ$	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	下游水位/m
1	0	188.68	3.489	11	45	94.34	2.118
2	0	132.08	2.655	12	45	56.60	1.572
3	0	94.34	2.118	13	60	188.68	3.489
4	0	56.60	1.572	14	60	132.08	2.655
5	30	188.68	3.489	15	60	94.34	2.118
6	30	132.08	2.655	16	60	56.60	1.572
7	30	94.34	2.118	17	75	188.68	3.489
8	30	56.60	1.572	18	75	132.08	2.655
9	45	188.68	3.489	19	75	94.34	2.118
10	45	132.08	2.655	20	75	56.60	1.572

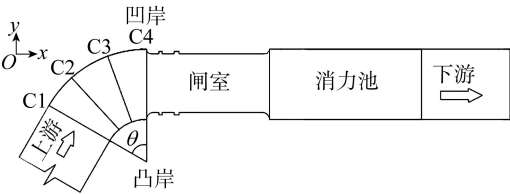


图6 监测断面示意图

3 结果与分析

3.1 闸前流速分布及特性

为分析弯道引起的斜向入流对闸前流场的影响,以流量 $Q = 56.60 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q = 188.68 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况

为例,研究不同斜向入流角度下闸前弯道 C1~C4 断面的流速分布特征。图 7 和图 8 分别为两种流量和 4 个入流角度情况下各断面纵向流速 v_x 的分布云图和二次流的矢量图。结果表明,随着水流从 C1 断面进入弯道,受下游弯道几何形态的影响,C1 断面流速分布不均匀,弯道断面纵向流速呈现“凹岸小、凸岸大”的分布特征,最大纵向流速靠近凸岸,从 C1 至 C4 断面,最大纵向流速位置逐渐向凹岸偏移,这与前人矩形弯道断面^[17]和梯形弯道断面^[18]情况下的计算结果一致。上述结果与天然弯曲河道有所差异,主要原因在于本研究采用矩形过流断面,断面形状规整且水位相对较低,而天然弯道中凹岸冲刷、凸岸淤积的地形特征使得水动力轴线更加贴近凹岸。同时,受弯道离心力的影响,各断面二次流形成逆时针主环流,表层水流从凸岸向凹岸运动,底层水流从凹岸向凸岸运动。入流断面 C1 的流速矢量主要从凹岸指向凸岸,而 C2 和 C3 断面处于弯道中段,环流特征更加明显。通过对各横断面的法向涡量积分,计算断面涡通量 Γ ,以此量化二次环流的强度,数值如图 7 和图 8 所示。沿程变化表明,随着断面逐渐靠近闸门,不同流量情况下环流强度逐渐增大。随入流角度增大,大流量情况下 ($Q = 188.68 \text{ m}^3/\text{s}$) 紊动强烈,同一断面最大纵向流速无明显变化规律,环流强度在入流角度为 60° 时达到最大值后开始衰减;小流量情况下 ($Q = 56.60 \text{ m}^3/\text{s}$),同一断面的最大纵向流速在入流角度为 60° 时达到最大值后开始衰减,环流强度无明显变化规律。

C4 断面靠近水闸,其流速大小与分布直接影响水闸的泄流能力,图 9 为不同工况下 C4 断面的垂线平均流速沿横断面的分布情况。结果表明:在相同流量下,断面平均流速随入流角度增大未呈现显著规律性变化;然而,凹凸岸流速差(凸岸最大流速与凹岸最小流速之差)则随入流角度增大而显著增加。此规律在大流量工况(图 9(d))下表现最为明显:当入流角度从 30° 增至 75° 时,流速差由 0.6 m/s (占断面平均流速的 16.5%) 升至 2.9 m/s (占比 84.3%),绝对值增幅达 383.3% 。结合前述流场分析可知,入流角度增大导致 C4 断面的横向环流呈现不同的变化特征,这种流速分布的变化对水闸泄流能力产生了重要的影响。具体而言,流速分布不均匀程度的加剧与横向环流的增强共同导致局部能量损失增加,从而降低了水闸的泄流能力。

3.2 闸前水位分布与变化

除流速分布外,闸前水位分布同样是影响水闸泄流能力的关键因素,邻近水闸的 C4 断面水位直接决定了闸前水位。图 10 为不同工况下 C4 断面的

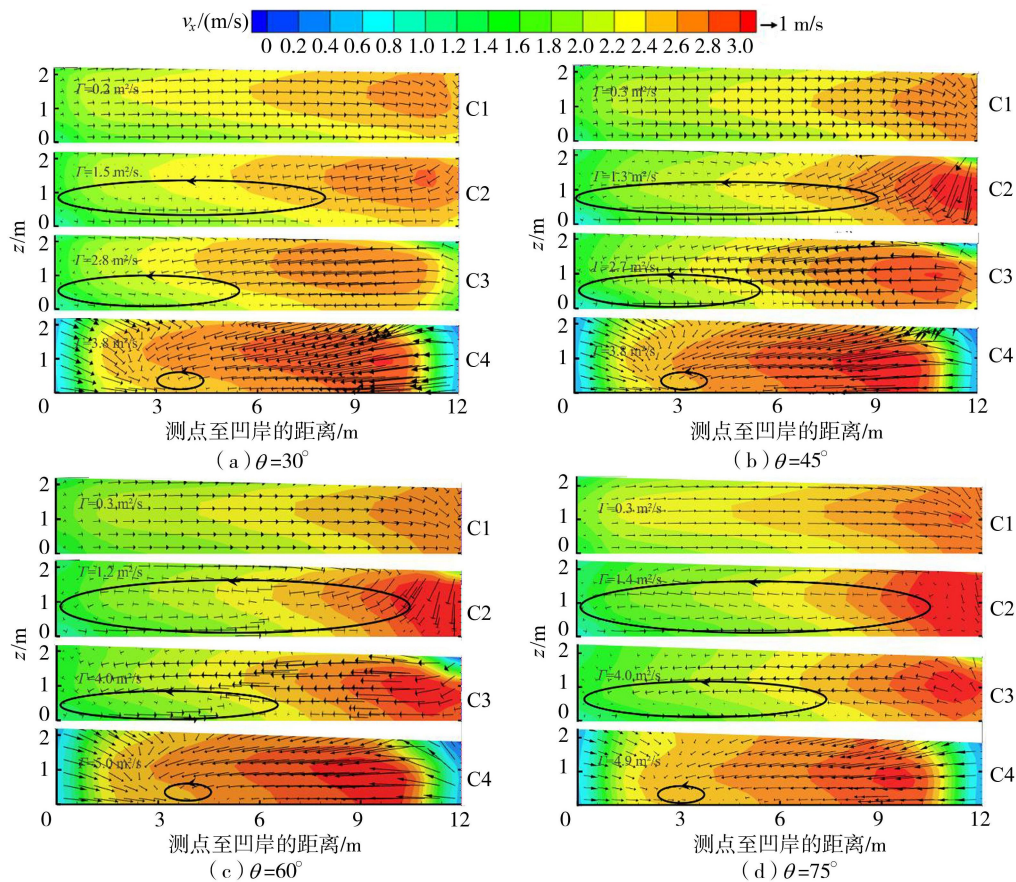


图7 $Q = 56.60 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下闸前弯道断面纵向流速云图和横向流速矢量图

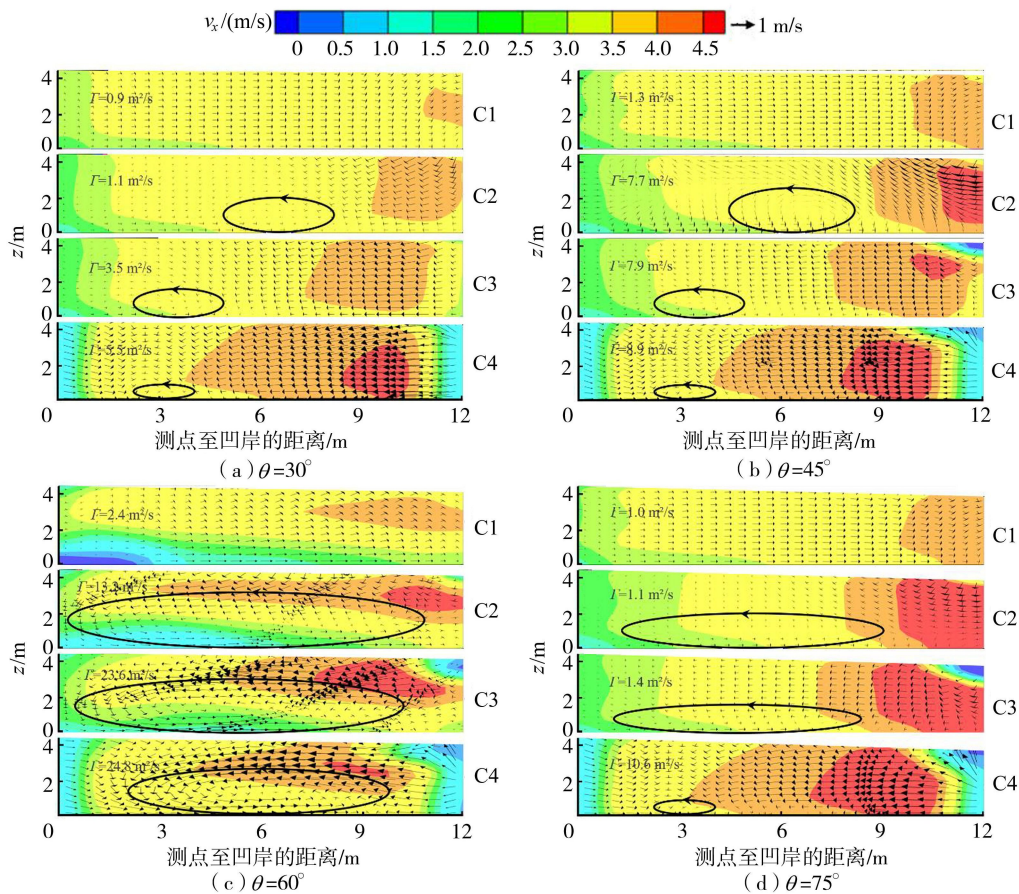


图8 $Q = 188.68 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下闸前弯道断面纵向流速云图和横向流速矢量图

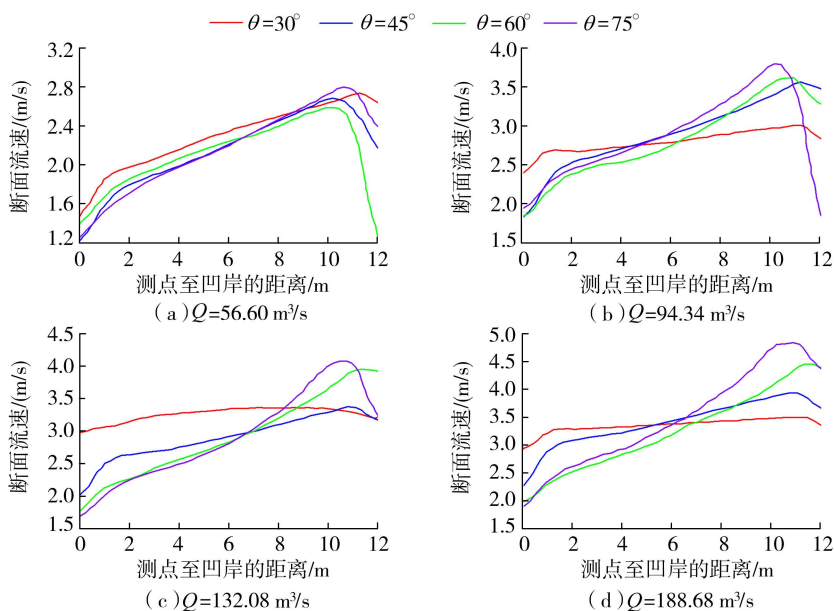


图9 不同工况下 C4 断面流速变化

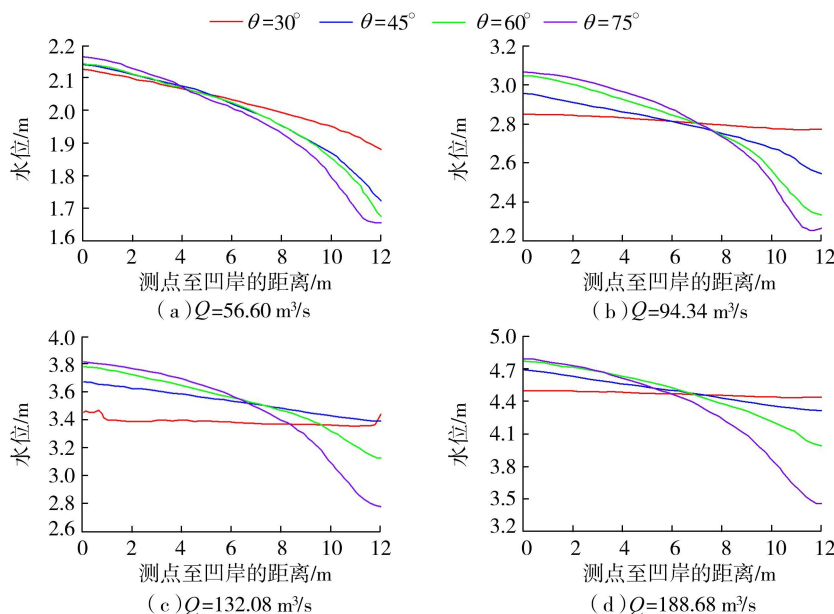


图10 不同工况下 C4 断面水位变化

水位沿横断面的分布情况。由图 10 可知,受弯道环流影响,C4 断面水位呈现凹岸高、凸岸低的横向非均匀分布。在相同流量下,断面平均水位随入流角度增大未呈现显著规律性变化;然而,凸凹岸水位差(凹岸最高水位与凸岸最低水位之差)随入流角度增大而显著增大。此规律在大流量工况(图 10(d))下尤为明显:当入流角度从 30° 增至 75° 时,水位差由 0.1 m (占断面平均水位 1.3%) 升至 1.3 m (占比 30.7%)。图 11 为横向水位比降与单宽流量和弗劳德数之间的关系,可以看出,不同入流角度下横向水位比降随流量和弗劳德数的变化趋势有所差异:随流量和弗劳德数的增大,横向水位比降从小角度下的降低趋势逐渐转变为大角度下的增大趋势。这一现象表明,在小角度条件下,流量和弗劳

德数增大所带来的水流惯性增强在一定程度上抑制了横向环流的发育;相反,在大角度条件下,流量和弗劳德数增大进一步强化了已十分显著的离心力作用,导致横向环流及相应的水位比降持续增强。以上结果表明,入流角度的增大不仅加剧了横向水位分布的不均匀性,更改变了水流惯性对横向环流的作用机制,其抑制作用逐渐削弱。凹凸岸显著的水位差将导致闸孔有效过流断面的形心发生偏移,增大泄流压力并降低泄流能力。针对斜向入流引起的横向水位分布不均问题,可以在凹岸设置导墙并向前延伸,迫使水流提前转向,使其在进入闸前引渠时就得到调整,从而减少闸前横向比降;也可以在闸前引渠中设置分流墩或导流堤,进而破坏大尺度的横向环流,将水流分割成多股,引导其平稳进入各闸孔。

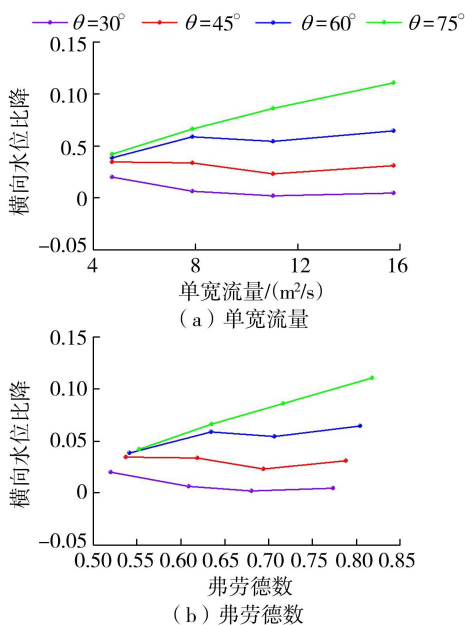


图 11 C4 断面横向水位比降与单宽流量、弗劳德数的关系

3.3 综合流量系数变化特征

根据数值模拟计算结果,利用堰流公式反推可得到不同工况下的综合流量系数。从水闸综合流量系数与入流角度的关系曲线(图 12)可以看出,相同流量条件下,流量系数随入流角度的增大均呈单调递减趋势。结合前述流场和水位分析可知,随入流角度增大,闸前二次环流尺寸显著增大,流速分布不均匀程度加剧,致使水流紊动加剧和能量耗散增大,同时断面横向水位分布不均匀程度加剧,较大水位差使得过流断面形心偏移,降低水闸过流能力,最终导致流量系数随入流角度增大而降低。当入流角度为 0° 时,流量系数基本不随流量的变化而变化,这是由于 0° 时,闸前无二次环流作用,水流仅受岸坡与闸墩的阻力作用,此时造成的局部水头损失较小,总体流量系数维持在 $0.365 \sim 0.370$ 。

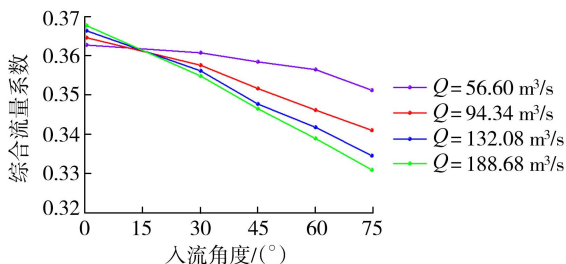


图 12 综合流量系数与入流角度的关系

流量增大导致闸前行近断面平均流速增加,进而水位壅高,导致水深略有变化。弗劳德数可以综合表征水流惯性力与重力作用的相对强弱。弗劳德数较高时,水流湍动加剧,涡旋耗能显著,边界层分离现象更为明显,导致局部水头损失增大,进而降低流量系数。此外,闸前行近断面的宽深比 (B/h) 作

为表征水流横向约束条件的关键参数,亦可能通过改变流速分布与涡旋尺度对流量系数产生影响。因此,综合流量系数表达式需要考虑入流角度、弗劳德数、宽深比的影响。Ranga Raju 等^[19]针对矩形堰提出了 $m = 0.81 - 0.6Fr$ 的综合流量系数半经验公式。在此基础上,本文进一步探讨了入流角度和宽深比对综合流量系数的影响,采用 $\cos\theta$ 反映横向环流的影响,并提出斜向入流情况下综合流量系数的计算公式:

$$m = a + bFr + cB/h + d\cos\theta \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 均为修正系数。

利用 20 组模拟数据,采用 C3 断面平均水位和平均流速进行计算,通过多元线性回归确定修正系数,最终拟合得到综合流量系数的计算公式:

$$m = 0.142 + 0.164Fr + 0.018B/h + 0.049\cos\theta \quad (2)$$

拟合决定系数 R^2 为 0.932。流量系数实测值与公式计算值的对比如图 13 所示,最大相对误差为 5.23%,平均相对误差为 2.01%,表明该公式可以较好地预测 $0^\circ \sim 75^\circ$ 弯道斜向入流条件下的水闸综合流量系数。

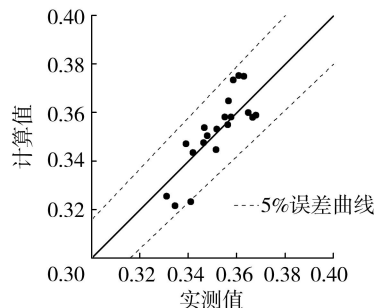


图 13 综合流量系数实测值与计算值的对比

4 结 论

a. 弯道斜向入流使闸前流场纵向流速呈现“凹岸小、凸岸大”的分布特征,最大纵向流速出现在凸岸;横断面二次流在弯道离心力作用下形成逆时针主环流,表层水流从凸岸向凹岸运动,底层水流从凹岸向凸岸运动。随入流角度增大,大流量情况下,同一断面环流强度在入流角度为 60° 时达到最大值后开始衰减;小流量情况下,同一断面的最大纵向流速在入流角度为 60° 时达到最大值后开始衰减;弯道进出口断面凹凸岸流速差大幅提升,其占断面平均流速的比例由 16.5% 最高增至 84.3%。

b. 弯道斜向入流使弯道出口断面水位呈现凹岸高、凸岸低的横向分布,且不均匀性随入流角度增大而加剧。相同流量下,凹凸岸水位差随入流角度增大显著升高,其占断面平均水位的比例由 1.3%

最高增至 30.7%,水流的惯性对横向环流的抑制作用随入流角度增大逐渐削弱。

c. 弯道斜向入流导致水闸综合流量系数随入流角度增大而降低。本文建立的考虑入流角度、弗劳德数和宽深比影响的流量系数计算公式能够较为准确地预测 0°~75°弯道入流角度范围内水闸的泄流能力。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2020[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020:39.

[2] 李凯,曾诚,陈辰,等. 明渠弯道几何形态对水动力特性的影响研究[J]. 水利水电科技进展,2026,46(2):12-21. (Li Kai, Zeng Cheng, Chen Chen, et al. Study on influence of geometric morphology of open-channel bends on hydrodynamic characteristics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2026,46(2):12-21. (in Chinese))

[3] 胡呈维,余明辉,渠庚. 急弯段水流能量输运与耗散特性试验研究[J]. 工程力学,2025,42(4):253-264. (Hu Chengwei, Yu Minghui, Qu Geng. The experimental study of the characteristics on flow energy transport and dissipation in sharply curved bends [J]. Engineering Mechanics,2025,42(4):253-264. (in Chinese))

[4] 扈霖,张耀哲,王文娥. 斜交实用堰泄流能力及水力特性的试验研究[J]. 水力发电学报,2018,37(11):56-64. (Hu Lin, Zhang Yaozhe, Wang Wen'e. Experimental study on discharge capacity and hydraulic characteristics of oblique practical weirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2018,37(11):56-64. (in Chinese))

[5] Tuyen N B. Flow over oblique weirs [D]. Delft: Delft University of Technology,2006.

[6] 王仕筠. 斜交堰的水力特性[J]. 江西水利科技,1997,23(1):30-33. (Wang Shijun. The hydraulic characteristic of skew weirs [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology,1997,23(1):30-33. (in Chinese))

[7] 王佳伟. 矩形渠道薄壁侧堰试验研究与数值模拟[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2015.

[8] 王莹莹,王文娥,胡笑涛,等. 矩形渠道薄壁侧堰水力特性试验及数值模拟[J]. 水力发电学报,2016,35(1):70-78. (Wang Yingying, Wang Wen'e, Hu Xiaotao, et al. Experimental and numerical studies on hydraulic characteristics of sharp-crested side weirs in rectangular channels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2016,35(1):70-78. (in Chinese))

[9] 迟颖. 侧堰溢洪道泄流能力的理论计算与模型试验成果分析与探讨[J]. 水利建设与管理,2015,35(1):19-21. (Chi Ying. Analysis and discussion on theoretical calculation and model test result of side weir spillway discharge capacity [J]. Water Conservancy Construction

and Management,2015,35(1):19-21. (in Chinese))

[10] 张桂铭,覃晓凤,张绪进,等. 侧向进流溢洪道泄流能力模型试验研究[J]. 中国水运,2023,23(24):107-109. (Zhang Guiming, Tan Xiaofeng, Zhang Xujin, et al. Model test study on discharge capacity of side inflow spillway [J]. China Water Transport,2023,23(24):107-109. (in Chinese))

[11] Vatankhah A R. Briefing: water surface profile over side weir in a trapezoidal channel [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,2012,165(5):247-252.

[12] Azimi H, Hadad H, Shokati Z, et al. Discharge and flow field of the circular channel along the side weir [J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2015,42(4):273-280.

[13] 戴文鸿,苗伟波,高嵩,等. 弯道水流运动及床面变形数值模拟研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(3):121-126. (Dai Wenhong, Miao Weibo, Gao Song, et al. Development of study on numerical simulation of meandering river flow and bed deformation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2014,12(3):121-126. (in Chinese))

[14] 熊毅,胡志根,陆贺,等. 弯曲河道立堵截流口水力特性分析[J]. 水利学报,2017,48(2):184-192. (Xiong Yi, Hu Zhigen, Lu He, et al. Study on hydraulic characteristics of end-dumping closure-gap in curve river [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(2):184-192. (in Chinese))

[15] 许东明. 弯道河势拦河闸坝过流特性的研究[J]. 福建水力发电,2023(1):4-6. (Xu Dongming. A study on the flow characteristics of sluice dams in curved river regimes [J]. Fujian Hydropower,2023(1):4-6. (in Chinese))

[16] 于佳敏. 铜城闸进水流态优化研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.

[17] 杨鑫,李兴国,孙雪岚,等. 基于 CFD 的簇状刚性植被弯道水流水力特性研究[J]. 中国农村水利水电,2025(4):31-38. (Yang Xin, Li Xingguo, Sun Xuelan, et al. Hydraulic characteristics of cluster rigid vegetation bend flow based on CFD [J]. China Rural Water and Hydropower,2025(4):31-38. (in Chinese))

[18] 李倩,马黎,余明辉,等. 凹岸边坡型式对急弯河道水力特性影响的数值模拟[J]. 水科学进展,2023,34(4):599-609. (Li Qian, Ma Li, Yu Minghui, et al. Numerical simulation of effect of outer bank slope types on the hydraulic characteristics in sharp bends[J]. Advances in Water Science,2023,34(4):599-609. (in Chinese))

[19] Ranga Raju K G, Prasad B, Grupta S K. Side weir in rectangular channel[J]. ASCE Journal of the Hydraulics Division,1979,105(5):547-549.

(收稿日期:2025-06-27 编辑:俞云利)