

# 配水井单侧过流下连续侧堰的过流特性

章艳<sup>1</sup>, 卞彬<sup>2</sup>, 徐辉<sup>3</sup>, 钱尚拓<sup>3</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 上海市城市建设设计研究总院, 上海 200125;  
3. 河海大学农业工程学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**采用基于VOF方法捕捉自由面的三维紊流数值模拟方法,研究不同来流流量下配水井单侧连续侧堰的过流特性。结果表明:设置连续侧堰的配水井在单侧过流时,分流特性在小流量和大流量条件下存在明显差异;小流量下,相邻侧堰的相互影响较大,配水井主渠中心线的水位沿程变化较小,各侧堰单宽流量的分布相对无序;大流量下,相邻侧堰的相互影响较小,配水井中心线的水位沿程为壅水曲线。根据流量系数特征将侧堰分为两类,分别建立了对应的流量系数与相对水头的关系式,可用于预测各堰的流量和整体的分流效果,为设计院对于污水处理厂配水井的工程设计和安全高效运行提供依据。

**关键词:**配水井;连续侧堰;过流特性;数值模拟;流量系数

**中图分类号:**TV132<sup>+</sup>.29 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)02-0023-05

**Flow characteristics of serial side weirs with unilateral flow in a water distribution well//ZHANG Yan<sup>1</sup>, BIAN Bin<sup>2</sup>, XU Hui<sup>3</sup>, QIAN Shangtu<sup>3</sup>** (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 3. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Flow characteristics of serial side weirs in a water distribution well under different inflow discharges were studied based on a 3D numerical simulation of turbulence, in which the free-surface was modeled by VOF method. The results show that evident difference of flow division characteristic exists between low and high discharges. Under low inflow discharge, the impact of adjacent side weirs is larger and the water lever along the distribution well centerline is little with relatively irregular unit discharge. Under high inflow discharge, the impact of adjacent side weirs is weak and the water lever along the distribution well centerline is a backwater curve. According to the characteristic of discharge coefficient, the side weir can be divided into two categories, and the relationship between the corresponding discharge coefficient and the relative head was established, which can be used to predict each weir's discharge and the overall discharge diversion effect. This study can provide basis for engineering design, safe and efficient operation of water distribution wells in sewage treatment plants.

**Key words:** water distribution well; serial side weirs; flow characteristic; numerical simulation; discharge coefficient

污水处理厂进水流量具有明显的不均匀性,在不同天气和不同时段均有较大的波动,常会超过处理能力而发生溢流。在污水厂中配套设置配水井进行水量调节,对于控制其溢流问题具有明显的效果。配水井常与连续侧堰联合使用<sup>[1]</sup>,通过控制各可侧堰的堰高来调节各出口的过流量,从而合理分配通往各污水处理单元的进水量,使其处于各单元的处理能力范围之内,防止发生污水溢流,是城市污水处理厂水流分配设施的重要组成部分,对于污水处理厂的安全稳定运行作用显著。配水井中连续侧堰

的流态复杂,既有侧堰本身对过流的影响,也有相邻侧堰水流间的相互作用,对配水井中连续侧堰的水力特性及分流规律进行研究,对污水处理厂水量分配调节及配水设施的工程设计具有重要意义。

目前关于侧堰分水流量的研究多集中在单个侧堰分水过流的领域,对连续侧堰分水规律及影响因素的研究较少。陈祺模等<sup>[2]</sup>发现缓流渠道的侧堰段渠道主流为壅水曲线,急流渠道的侧堰段渠道主流为降水曲线;在缓流情况下,通过试验发现侧堰流量系数与侧堰末端渠道断面弗劳德数有关。Singh

等<sup>[3]</sup>认为矩形侧堰的流量系数  $m$  与佛劳德数  $Fr$  成正比,与侧堰高度与上游水深之比  $P/h_1$  成反比。Borghesi 等<sup>[4]</sup>认为  $m$  与  $Fr$  和  $P/h_1$  以及侧堰宽度与主渠宽度之比  $L/B$  有关。王莹莹等<sup>[5]</sup>认为过堰流量受渠道和侧堰的水力要素以及流体的物理性质等影响,发现  $m$  与堰上水深和侧堰高度之比  $h/P$  的关系较  $Fr$  显著, $m$  与  $h/P$  呈指数负相关。张靖等<sup>[6]</sup>发现 Z 形堰中,堰上水深与堰高之比越大,流量系数越小。刘海强等<sup>[7]</sup>对矩形直口渠分水口分流规律进行试验研究,发现分流比与相对堰上水头存在线性关系,不同来流量下,分流比随相对堰上水头的增大而增大。林慧萍等<sup>[8]</sup>对污水处理厂连续侧堰形式的进水分配渠研究发现,进水分配渠水面沿程升高引起的配水堰堰上水头变化,是导致 V 形滤池进水分配渠配水不均匀的主要原因。

随着计算流体力学 (CFD) 方法的发展与应用, Qian 等<sup>[9]</sup>尝试借助数值模拟方法研究溢流堰的过流能力。陈大宏等<sup>[10]</sup>利用三维紊流模型封闭雷诺时均方程,VOF (volume of fluid) 方法追踪自由表面,对过堰流动进行了数值模拟。李珊珊等<sup>[11]</sup>采用基于 VOF 自由面捕捉的全三维紊流数值模型,对琴键堰流量进行了数值模拟研究。林慧萍等<sup>[8]</sup>利用 VOF 方法和  $k-\varepsilon$  湍流模型,对某自来水厂 V 形滤池的进水分配渠内部的带自由液面的流体进行 CFD 数值模拟。以上都证明了目前使用数值模拟方法研究堰流已经相对成熟。

王莹莹<sup>[12]</sup>使用试验方法并应用 Flow-3D 软件,采用 Tru VOF 法和 RNG  $k-\varepsilon$  模型对侧堰水力性能进行三维数值模拟,通过对渠道水面线实测值和 Flow-3D 模拟值的对比分析发现两者具有较好的一致性。王佳伟<sup>[13]</sup>通过 Flow-3D 软件模拟了矩形渠道侧堰的水力性能,模拟所得水流流态、水面线变化、流速分布规律等与试验结果非常吻合,说明数值模拟的

模型可靠、结果准确,可进一步通过数值模拟研究其他侧堰形状的水力性能,为侧堰体型优化提供参考。扈霖<sup>[14]</sup>应用 Flow-3D 软件对斜交实用堰进行了模拟,将各个斜交角、各流量下的堰上水深模拟结果以及上游流场特性与模型试验结果进行对比分析,得到了较为理想的模拟结果,证明了通过数值模拟方法研究斜交实用堰过流能力和上游流场特性的可行性。

工程经验表明,对于连续侧堰,相邻侧堰的流态和分流特性存在相互影响,弄清楚该问题有利于连续侧堰配水井的妥善设计和安全高效运行。本文采用数值模拟方法研究配水井单侧过流下连续侧堰的分流特性和规律,获得配水井内水面线沿程变化规律,通过建立流量系数与堰上水头的关系式,预测各堰的流量和整体的分流效果,以期配水井的工程设计和安全高效运行提供理论基础和技术支持。

## 1 数学模型建立与参数确定

以上海市某大型污水处理厂典型的配水井为例,研究配水井单侧过流下连续侧堰的水力特性。图 1 为该配水井的平面布置图,左侧为单向孔口进口,上下两侧对称分布 10 个侧堰出流,从左至右前 3 个侧堰宽为 6 m,后 7 个侧堰宽为 4.7 m。各侧堰高度均为 9.5 m。配水井主渠道长 75.7 m,宽 20.6 m。本文仅针对右堰堰门全开情况进行研究。

### 1.1 数学模型及边界条件

连续侧堰是薄壁侧堰的一种,本文采用 Flow-3D 软件模拟配水井单侧过流下连续侧堰的水力特性和分流规律,参照文献选取 VOF 两相流模型和 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型。对比设计单位提供的原型资料可得,170 万  $\text{m}^3/\text{d}$  流量的来流通过右侧 10 堰门全开的配水井分配至两个出口的流量分别为 110 万  $\text{m}^3/\text{d}$  和 60 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,与数值模拟计算结果 109.67 万  $\text{m}^3/\text{d}$  和 60.33 万  $\text{m}^3/\text{d}$  相符,差距在

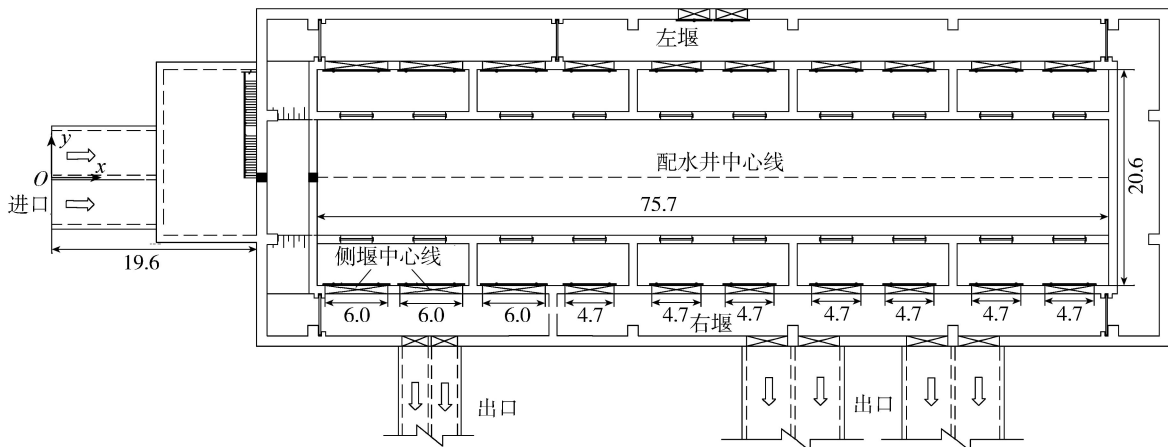


图 1 总配水井平面布置 (单位:m)

0.19% 以内,反映了本数值模拟的可行性。

模型控制方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (2)$$

式中: $t$ 为时间; $u_i (i=1,2,3)$ 、 $u_j (j=1,2,3)$ 分别为 $x,y,z$ 方向的速度分量; $x_i (i=1,2,3)$ 、 $x_j (j=1,2,3)$ 为笛卡尔坐标系坐标; $\mu$ 为水的动力黏滞系数; $\rho$ 为水的密度; $p$ 为水微元体上的压力; $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。

总配水井内存在急缓流过渡、水舌跌落、水跃等非稳定的水流现象,根据常用工程湍流模型的应用范围和以往计算经验,采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型能够更好地满足配水井的数值模拟研究要求<sup>[15-16]</sup>。

$k-\varepsilon$  方程形式为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中  $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \eta \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) / (1 + \beta \eta^3)$

$$\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{0.5} k / \varepsilon$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: $k$ 为紊动能; $\varepsilon$ 为耗散率; $\mu_t$ 为动力涡黏系数; $G_k$ 为平均速度梯度产生的湍流动能; $\alpha_k$ 、 $\alpha_\varepsilon$ 为 $k$ 、 $\varepsilon$ 对应的 Prandtl 数; $E_{ij}$ 为主流的时均应变率。模型常数取值: $\eta_0=4.377$ 、 $\beta=0.012$ 、 $C_{1\varepsilon}=1.42$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.68$ 。

基于有限体积法离散动量方程,采用抛射法来求解动量守恒及质量守恒方程。压力求解采用广义极小残值(GMRES)方法,通过实时修改亚松弛因子来加快收敛速度。对流项采用二阶迎风格式。对于黏性应力项采用全显式求解方式,计算结果更精确,能同时求解动量方程和连续性方程。

Flow-3D 基于结构化六面体网格的 Favor 方法对计算域进行划分,具有网格需求量较小,计算速度更快的特点<sup>[17]</sup>。

边界条件设置如下:进口边界采用质量流量,上部设置为零压开敞式边界,出口采用静压为零的自由出流,壁面为无滑移壁面。

## 1.2 计算模型和网格划分

图2为总配水井三维模型,单侧过流情况下,进

水口左边10个堰门全部关闭,仅开启进水口右堰10个堰门 R1 ~ R10。设置计算迭代时间步长为  $10^{-4}$  s,初始时刻将配水井内 9.5 m 高程以下的水体分数设为 1。

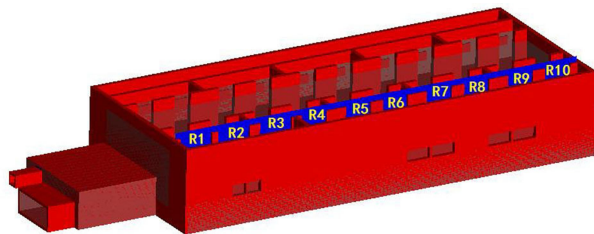


图2 总配水井三维模型

图3为计算模型网格划分情况。选取3种网格总量方案(300万、600万、800万)进行网格无关性验证,结果表明,网格数量达到600万以上时,各侧堰流量差值的最大值不超过4%。综合考虑计算精度和计算成本,最终采用网格数量600万的方案。

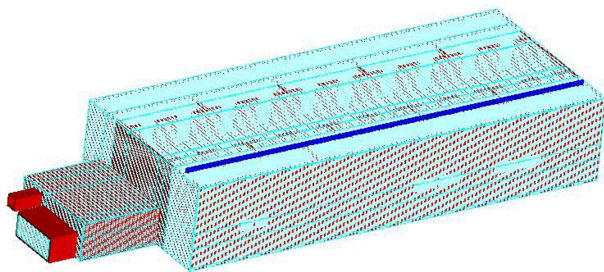


图3 计算模型网格划分

## 1.3 试验方案

12个工况配水井进水口来流量大小如表1所示。

表1 12个工况配水井进水口来流量

工况	流量/ ( $\text{万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	工况	流量/ ( $\text{万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	工况	流量/ ( $\text{万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
1	139	5	218	9	281
2	170	6	233	10	300
3	186	7	249	11	321
4	201	8	265	12	341

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 水面线沿程分布

为了研究连续侧堰对配水井不同位置水深的影 响,图4选取5个代表性的配水井入水口来流量绘制配水井中心线的水深在  $x$  方向的分布。

由图4可知,配水井中心水面线变化规律在来流量约 249 万  $\text{m}^3/\text{d}$  时发生转变。当来流量小于 249 万  $\text{m}^3/\text{d}$  时,配水井中心线变化幅度较小,沿程中心线在平均值附近 0.12% 以内振荡。随着来流量增大,配水井中心线变化幅度也在增大。当来流量大于 249 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,配水井中心水面线在侧堰 R1 处有明显下降,在侧堰 R2 处下降至最低值后迅速上升,后

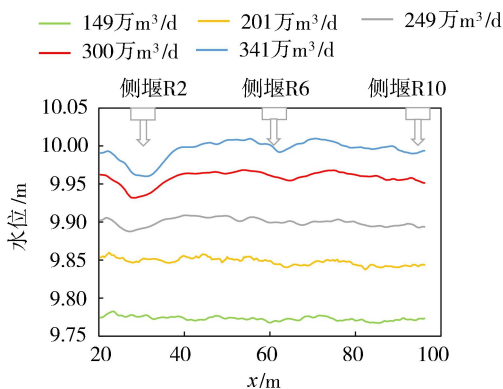


图4 不同来流量下配水井中心水面线

续侧堰水面中心线曲线趋于平缓,但在侧堰 R6 和 R10 处配水井主流发生了轻微的水面波动现象。因为连续侧堰的相互影响,来流量小于 249 万  $\text{m}^3/\text{d}$  时,由于流速较小,主渠中心水面线受相邻侧堰影响程度更大;当来流量大于 249 万  $\text{m}^3/\text{d}$  时,由于配水井中流速较大,主渠水面中心线受到相邻侧堰影响较小,总体中心线为一壅水曲线。上述结果符合前人对于单个侧堰研究中的规律<sup>[2]</sup>。

## 2.2 不同侧堰堰上水头与单宽流量的关系

为了研究不同来流量下,侧堰中心点处堰上水头  $H$  和单宽流量  $q$  之间的关系以及连续侧堰单宽流量分布情况,选取配水井中心线所在的立面作为堰上水头的计算断面。通过在各侧堰堰顶设置流量监测断面,对各侧堰过流流量进行实时监测,该方法可输出监测断面上各网格的流速积分结果。根据数值模拟所得流量和水头数据,绘制配水井入水口 6 个不同来流量时各侧堰中心点处堰上水头与单宽流量沿程分布如图 5 所示。

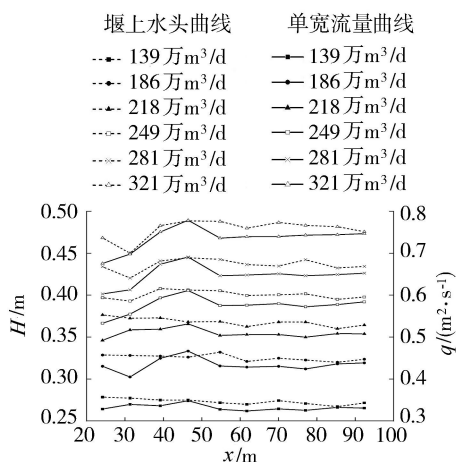


图5 不同来流量下各侧堰中心点处堰上水头与单宽流量沿中心线分布

由图 5 可知,同一来流量下,各侧堰中心点处堰上水头与通过的单宽流量具有较强的相关性,除个别受到相邻侧堰水流波动的影响,中心点处堰上水

头越高的侧堰,单宽流量也越大。

流量小于 249 万  $\text{m}^3/\text{d}$  时,各侧堰单宽流量分布相对无序;流量大于 249 万  $\text{m}^3/\text{d}$  时,各侧堰单宽流量分布有如下规律:从侧堰 R1 到 R4,通过的单宽流量逐渐增大,侧堰 R4 通过的单宽流量最大;从侧堰 R4、R5 处,单宽流量突然减小;后面的侧堰 R5 到 R10,单宽流量变幅较小;在最后一个侧堰 R10 处,单宽流量有小幅增加。可能的原因为:来流量较小时,相邻侧堰受到的影响扰动更大,增加了流量分布的无序性;流量较大时,相邻侧堰水流扰动影响较小;侧堰 R1 到 R3 的侧堰宽度为 6 m,大于后续侧堰 4.7 m 的宽度,因此侧堰 R1 到 R3 的单宽流量依次增大,在水流惯性作用下,侧堰 R4 通过的单宽流量达到最大,后续侧堰单宽流量依次减小。上述结论与 Vatankhah 等<sup>[18-19]</sup>认为侧堰宽度与分流量成正比的结论一致。

## 2.3 同一侧堰单宽流量与堰上水头的关系

为了研究各侧堰的堰上水头和单宽流量在不同总来流量下之间的关系,图 6 给出不同总来流量下侧堰 R1 ~ R10 单宽流量  $q$  和中心点处堰上水头  $H^{1.5}$  之间的关系。

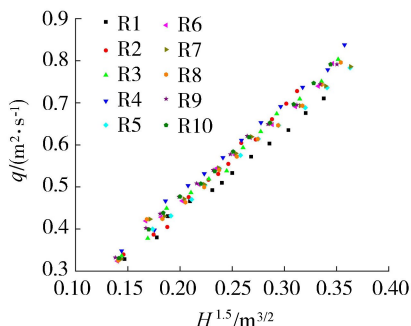


图6 单宽流量与堰上水头的关系

由图 6 可得,在总来流量 139 ~ 341 万  $\text{m}^3/\text{d}$  范围内,各侧堰的单宽流量  $q$  和中心点处堰上水头  $H^{1.5}$  呈现出良好的线性关系, $q$  随着  $H^{1.5}$  增大而增大。其中,侧堰 R1 的数据相较于其他侧堰偏低。

薄壁堰的堰流计算公式<sup>[20]</sup>为

$$q = Q/b = m\sqrt{2g}H^{1.5} \quad (5)$$

式中: $Q$  为侧堰流量; $b$  为侧堰宽度; $g$  为重力加速度; $m$  为流量系数。

通过式(5)可求出各侧堰不同来流量下的流量系数  $m$ ,图 7 为来流量大于 249 万  $\text{m}^3/\text{d}$  时各侧堰  $m$  和  $H/P$  之间的关系。从图 7 中发现,在不同的相对水头  $H/P$  下,除侧堰 R1 外,侧堰 R2 ~ R10 的  $m$  离散程度低,在 0.49 ~ 0.53 之间小范围波动。采用 origin 数据分析软件,得到 R2 ~ R10 的  $m$  拟合曲线为

$$m = -0.1255 H/P + 0.57 \quad (6)$$

R1 的  $m$  拟合曲线为

$$m = -0.6959 H/P + 0.509 \quad (7)$$

拟合式(6)(7)与试验数据之间的残差平方和分别为  $7.58 \times 10^{-3}$  和  $3.2 \times 10^{-5}$ , 平均相对误差均小于 10%。侧堰 R2 ~ R10 的流量系数离散程度较低, 且与侧堰 R1 存在明显区别, 与图 4 中配水井中心水面线的沿程变化规律有关, 即在侧堰 R1 处水面线有明显的下降, 而侧堰 R2 ~ R10 处水面线整体波动不大。

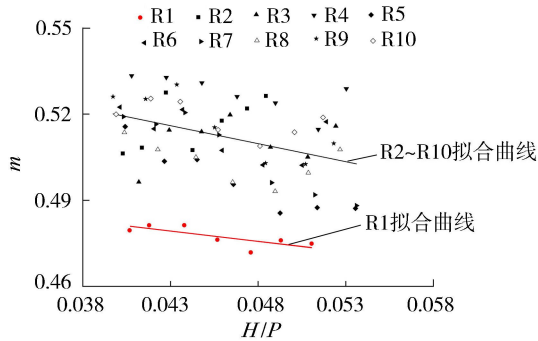


图 7 流量系数  $m$  和相对水头  $H/P$  的关系曲线

### 3 结 论

a. 设置连续侧堰的配水井在单侧过流时, 分流特性在小流量和大流量条件下存在明显差异。小流量下, 相邻侧堰的相互影响较大, 配水井主渠中心线的水位沿程变化较小, 各侧堰单宽流量的分布相对无序。大流量下, 相邻侧堰的相互影响较小, 配水井中心线的水位沿程为壅水曲线, 从侧堰 R1 ~ R10, 单宽流量先增大, 并在 R4 达到最大值, 此后逐渐减小。原因为侧堰的单宽流量与侧堰宽度有关, 堰宽增加, 单宽流量增大。

b. 根据数值模拟结果, 各侧堰的单宽流量  $q$  和  $H^{1.5}$  具有良好的线性关系, 并且侧堰 R1 的数据相较于其他侧堰偏低。进一步发现侧堰 R1 和 R2 ~ R10 具有不同的流量系数与堰上水头关系, 关系式分别为  $m = -0.6959H/P + 0.509$  和  $m = -0.1255H/P + 0.57$ , 残差平方和分别为  $3.2 \times 10^{-5}$  和  $7.58 \times 10^{-3}$ , 平均相对误差均小于 10%。利用流量系数拟合式和薄壁堰流计算公式可以初步预测各堰的流量和整体的分流效果, 为设计院对于污水处理厂配水井的工程设计和安全高效运行提供参考和依据。

c. 侧堰 R2 ~ R10 与 R1 在流量系数关系式上存在明显区别, 与配水井中心水面线沿程变化规律有关, 即在侧堰 R1 处水面线有明显的下降, 而侧堰 R2 ~ R10 处水面线整体波动不大。表明连续侧堰的流量系数较为复杂, 与侧堰位置和相邻侧堰影响有关, 具体有待后续深入研究。

### 参考文献:

- [1] 陈金锥, 陈水佛, 谢善斌. V 型滤池进水渠配水均匀性探讨[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 240-243. (CHEN Jinzhui, CHEN Shuidi, XIE Shanbin. A discussion of distributing uniformity in entering trench of V-shape filter[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science), 2005, 33(2): 240-243. (in Chinese))
- [2] 陈祺模, 谢佩珍, 陈日齐, 等. 侧堰水力特性试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1979, 19(1): 26-29. (CHEN Qimo, XIE Peizhen, CHEN Riqi, et al. Research on hydraulic characteristics of side weir[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science), 1979, 19(1): 26-29. (in Chinese))
- [3] SINGH R, MANIVANNAN D, SATYANARAYANA T. Discharge coefficient of rectangular side weirs[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1994, 120(4): 814-819.
- [4] BORGHEI M, JALILI M R, GHODSIAN M. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(10): 1051-1056.
- [5] 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]. 水力发电报, 2016, 162(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, 162(1): 70-78. (in Chinese))
- [6] 张靖, 常倩, 张庆华, 等. Z 形薄壁堰过流能力试验[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 38-43. (ZHANG Jing, CHANG Qian, ZHANG Qinghua, et al. Experiments on discharge coefficient of Z-shape weirs[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 38-43. (in Chinese))
- [7] 刘海强, 王文娥, 胡笑涛, 等. 矩形渠道分水口分流规律及影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 117-122. (LIU Haiqiang, WANG Wen'e, HU Xiaotao, et al. Water-division rules and the influencing factors of rectangular channel[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(9): 117-122. (in Chinese))
- [8] 林慧萍, 许仕荣, 黄茂林, 等. 基于 CFD 的 V 型滤池进水分配渠配水均匀度优化[J]. 中国给水排水, 2019, 35(15): 59-67. (LIN Huiping, XU Shirong, HUANG Maolin, et al. Optimization of water distribution uniformity of inlet distribution channel in V-type filter based on CFD[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(15): 59-67. (in Chinese))
- [9] QIAN Shangtuo, WU Jianhua, ZHOU Yu, et al. Discussion of "hydraulic performance of an embankment weir with rough crest" by Stefan Felder and Nushan Islam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(4): 07018003.

(下转第 35 页)