渠道下游常水深运行非恒定流数值模拟研究

吉利娜¹,吕宏兴^{1,2},余国安³

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀 与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;3 清华大学 水利系 河流海洋研究所,北京 100084)

[摘 要] 为了研究闸门调控下的梯形渠段非恒定流过渡过程,在下游常水深运行条件下,采用矩形网格特征 线法,对渠段上游来水量变化和渠段上游闸门在不同线性调节方式下引起的非恒定流过渡过程进行了数值模拟,研 究了渠段上游来水量变化时下游流量、上游水深变化过程,探讨了渠段上游闸门在不同线性调节方式下上、下游流量 和上游水深的变化过程。结果表明,当上游来水量变化时,下游流量和上游水深经历一段时间都趋于稳定,且流量变 幅越大,趋于稳定的时间也越长。闸门按线性函数式调节开度后,闸门过流流量、上游水深基本按线性规律变化,而 后基本维持稳定不变。

[关键词] 下游常水深运行;闸门调控;明渠非恒定流;数值模拟 [**中图分类号]** TV133.2 [**文献标识码**] A [**文章编号**] 1671-9387(2007)06-0195-07

Numerical simulation of unsteady flow in canals operated with constant downstream water depth

JILi-na¹,LU Hong-xing^{1,2},YU Guo-an³

 (1 College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
 2 The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;
 3 Dept of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : In order to research unsteady flow transition processes at trapezoidal canal reach with sluice gate controlling under the condition of constant downstream water depth operation, rectangular grid characteristic method was used, and unsteady flow transition processes caused by upstream discharge variation or sluice gate regulating at different linear modes were simulated. Downstream discharge and upstream water deep transition process were researched owing to variation of upstream incoming flow to the reach, discharge of upstream and downstream, upstream water deep transition process were studied due to upstream sluice gate regulating in different linear modes. Results showed when upstream discharge changed, downstream discharge and upstream water depth got gradually to a stable state after a certain time, and the larger the discharge variation, the longer the time interval needed for the flow to reach stable state. When gate was regulated with the given linear functions, discharge through the gate and upstream water depth varied basically in linear mode, and then they basically maintained stable.

*[收稿日期] 2006-04-18

[基金项目] 国家高技术发展计划("863"计划)项目节水农业"十五"重大科技专项(2002AA2Z4131);中国科学院水利部水土保持研究 所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(10501-141)

[[]作者简介] 吉利娜(1978 -),女,陕西临潼人,在读硕士,主要从事灌溉水力学和灌区生态需水量计算方法研究。

[[]通讯作者] 吕宏兴(1955-),男,陕西陇县人,教授,博士生导师,主要从事灌溉水力学研究。

Key words : constant downstream water depth; sluice gate regulation; open-canal unsteady flow; numerical simulation

现有灌区的渠系输水损失很高,渠灌区渠系输 水损失高达 50%~60%,井灌区也高达 40%以 上[1-2]。农业用水浪费如此严重的原因,除渗漏损失 外.因流量调度不当导致的弃水也是灌溉水损失的 重要因素^[3-4]。灌溉渠系运行时,当通过闸门调节流 量时,渠道中将产生非恒定(渐变)流,其水位、流量 等水力要素随时间和位置变化,因此实时掌握这种 非恒定流中水位、流量等的动态变化过程、从而适时 适度调控渠道闸门,是科学、合理调控流量的前提和 基础。在明渠非恒定流数值求解方法(技术)方面, 随着计算机技术的应用,明渠非恒定流模拟已取得 了长足的进展。在明渠非恒定流的数值模拟技术日 趋成熟之后,灌溉渠系的运行控制(水流控制)理论 和实践(尤其是闸门调控)也得到了快速发展。如美 国国家内务部垦务局(U.S.Department of Interior, Bureau of Reclamation)于 1966 年即开始有关渠系 自动控制项目的研究,已形成了比较完整的渠系运 行理论,而且研究成果在许多渠系上得到了成功应 用;日本自1978年开始执行"农业水利设施水管理 系统化"的国家级研究项目,其成果为日本农田水利 的现代化奠定了技术基础;国内对灌溉渠道流量优 化调度和水力模拟问题也进行了研究[1,3],为全面了 解渠道非恒定流的过渡过程及其影响因素发挥了积 极作用。本试验采用矩形网格特征线法,对下游常 水深运行的渠道非恒定流过渡过程进行模拟研究, 尝试找出合理的闸门调节方式,在理论和实际应用 中都是一件有意义的工作。

1 闸门调控下的灌溉渠道非恒定流理 论

灌溉渠道控制理论和控制实践的基础是预知渠 道水流的实时变化,明渠非恒定流问题可由以下 圣·维南方程组描述:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q_l , \qquad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(a \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial s} + gAS_f - q_l \left(v_{\varphi} - v \right) = 0_{\circ}$$
(2)

式中:*B* 为对应水位 *Z* 时的过水断面水面宽, m, *B* = *B*(*Z*); *Z* 为水位, m; *Q* 为流量, m³/s; *q* 为单位长度 渠道的旁侧入流量, 流入为正, 流出为负, m²/s; *t* 为 时间, s; *A* 为过水断面面积, m²; *g* 为重力加速度, m/s²; *s* 为渠道沿水流方向的距离, m; *S*_f = *Q* | *Q* | / K^2 ,其中 *K*(m³/s) 为流量模数, $K^2 = A^2 C^2 R$, *C* = $\frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$, *n* 为渠道糙率, *R* 为水力半径, m; *v*_g 为侧 向入流在渠道主流方向上的流速分量平均值, m/s; *v* 为主流平均流速, m/s。

通过数值计算求解该方程,可模拟渠道中非恒 定流的过渡过程。灌溉渠道非恒定流的数值计算方 法有特征线法(包括特征线网格法和矩形网格法两 类)和差分法(又可分为显式格式和隐式格式两种)。 本文采用特征线法中的矩形网格法求解。特征线法 由 Aabott 于 1966 年提出,其基本思想是将圣 · 维 南方程组的两个偏微分方程(式(1),(2))通过线性 组合(具体组合方法参见文献[5-6])化为常微分方 程,即顺、逆特征线方程和顺、逆特征方程:

$$\pm = v \pm \sqrt{g \frac{A}{B}} = v \pm \sqrt{g h} = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}, \qquad (3)$$

$$B(= \tau) \frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = (= t) q - N = = \tau_{\circ}$$
(4)

式中: \pm 为顺、逆行波波速, m/s; h 为水深, m; N = B $\cdot \left(\frac{Q^2}{A}\right) \cdot i - g \cdot A \cdot S_f$, i 为渠道底坡; q 为单宽流 量, m²/s。

要求圣 维南方程组的离散解,就是求两特征 线 $_{+}$ 和 的交点。网格法就是把待求解区域的距 离 - 时间平面划分成矩形网格,网格的交点称为节 点。用 i 表示距离的分段序号,j 表示时间的分段序 号。 s_i 为距离步长, t_j 表示时间步长。假定 j 时 刻及其以前的时刻为已知,而 j + 1 及其以后的时刻 为未知,顺、逆特征线 $_{+}$ 和 的交点 P 就是要求 的解。由待求点 P 向已知时刻 j 作顺、逆特征线 $_{+}$ 和 ,两特征线与时刻 j 的交点分别为 L 和 R,两 点落在与点 P 相邻的左右两距离步长之间。

采用柯朗格式可得到时刻 P 的水位(Z_P)和流 量(Q_P)的矩形网格特征线法计算公式,即:

$$Z_{P} = \frac{(B_{+})_{M} \cdot Z_{R} - (B_{-})_{M} \cdot Z_{L} + Q_{L} - Q_{R} + [(_{+})_{M} - (_{-})_{M}] \cdot t}{(B_{+})_{M} - (B_{-})_{M}},$$
(5)

 $Q_{P} = (B_{-})_{M} \cdot (Z_{P} - Z_{L}) - (-)_{M} \cdot t + Q_{L}, (6)$ $Q_{P} = (B_{+})_{M} \cdot (Z_{P} - Z_{R}) - (-+)_{M} \cdot t + Q_{R}, (7)$ 式中: $Z_{L}, Q_{L}, Z_{R}, Q_{R}$ 分别为 L 和 R 点的水位和流量。

另外,由于灌溉渠道中主要由闸门完成对流量 和水位(水深)的控制和调节过程,闸门开度 G_a 与闸 前水深 h_u 、下游水深 h_d 、闸孔出流流量 Q_s 及流量系 数 c_d 等因素相互影响(属一种耦合系统),计算过程 不能直接完成,本文采用试算法,控制目标为闸孔出 流流量 Q_s 与调节流量 Q_{ijt} 一致;当两者不一致时, 调节闸门开度 G_a ,直到 Q_s 与 Q_{ijt} 一致为止。

闸孔流量系数 ca 是闸门上下游水位差、闸门开 度、闸门底缘形状等因素的综合函数,在渠道流量变 化或闸门调控过程中,闸孔流量系数 ca 是实时变化 的,因此在非恒定流的数值模拟过程中,应体现出这 种实时的变化。以前的灌溉渠道非恒定流研究中对



图 1 闸孔自由出流示意图

Fig. 1 Free flow from sluice hole

将闸孔流量系数 ca 写成如式(8)和(9)的函数 式,既考虑了其受上下游水位、闸门开度、闸门底缘 形状等因素的影响,反映了流量系数 ca 的实时变 化,又省去了烦琐的查表确定流量系数的过程,且更 便于应用计算机计算闸门开度或闸门过流量。

2 闸门调控下的渠道非恒定流过渡过 程模拟

单一渠段的非恒定流过渡过程是灌溉渠道水流 模拟的基本情形。本文将针对规则的梯形单一渠 段,按照下游常水深运行方式(图 3),在一定的初始 条件和不同的调节流量下,应用渠道非恒定流数值 模拟的特征线法及矩形网格计算格式,对模型渠段 由于流量变化或闸门调节所引起的非恒定流过渡和 闸门开度变化过程进行模拟,并分析这个过渡过程 闸孔流量系数 ca 按常数对待,或采用繁琐的查表法 查出 ca 的值^[7],本文中流量系数 ca 的取值,参考 Swamee^[8]根据 Henry 绘制的过闸流量系数试验曲 线拟合的平板闸门过流流量系数函数式。

当 h_u 0.81 $\cdot h_d \cdot \left(\frac{h_d}{G_o}\right)^{0.72}$ 时为闸孔自由出流 (图 1),流量系数:

$$c_d = 0.\ 611 \quad \cdot \left(\frac{h_u - G_o}{h_u + 15 \, G_o}\right)^{0.\ 072} \, \mathbf{o} \tag{8}$$

当 $h_d < h_u < 0.81 \cdot h_d \cdot (\frac{h_d}{G_o})^{0.72}$ 时为闸孔淹没 出流(图 2),流量系数:

 $c_{d} = 0.\ 611 \quad \cdot \ (\frac{h_{u} - G_{o}}{h_{u} + 15 G_{o}})^{0.\ 072} \quad \cdot \ (h_{u} - h_{d})^{0.\ 7} \quad \cdot \ (0.\ 32 \quad \cdot \ h_{u} - h_{d})^{0.\ 7}$

$$[0.81 \cdot h_d \cdot (\frac{h_d}{G_o})^{0.72} - h_u]^{0.7} + (h_u - h_d)^{0.7} \}^{-1} \circ$$
(9)



图 2 闸孔淹没出流示意图

Fig. 2 Submerged flow from sluice hole

的影响因素。渠段下游常水深是灌区大多数渠系采 用的运行方式,分水闸或引水口位于渠段下游闸门 附近,从而可以按渠中最大的相对稳定水深设计引 水流量。

所选模型渠段断面为梯形,渠道基本参数为:渠 段长 $l = 5 \ 089.2 \ m$,底宽 $b = 5.0 \ m$,渠道底坡 $i = 0.000 \ 2$,边坡 m = 3,糙率 n = 0.013,渠段上下游端 平板闸门宽度均为 $b_s = 4.0 \ m$ 。初始条件时渠段流 量为 30 m^3/s ,渠段沿程无流量分出和汇入。通过 对恒定非均匀流的水面线计算,可得渠段中各个过 水断面的初始水深值。

将此渠段划分成 10 个计算段,其中渠段上游闸 门和下游闸门分别位于其第 1 断面和第 11 断面。 表 1 给出初始时刻各断面渠底相对高程和水位及划 分的单元渠段长。



图 3 渠段下游常水深运行方式

Fig. 3 Operation of canal reach with constant downstream water depth

表 1 模型渠段初始时刻各断面渠底相 对高程、水位及单元渠段长



of each segment m			
断面编 Transe numb	号 渠底(相对 cts Relative al er of channel)高程 初始水 titude Original bottom lever	位 单元渠段长 water Length of cell trench
1	1.018	8 5.51	8
2	0.91	5 5.51	5 513.21
3	0.813	3 5.51	3 512.13
4	0.71	1 5.51	1 510.94
5	0.609	9 5.50	9 509.90
6	0.50	7 5.50	7 508.96
7	0.40	5 5.50	5 508.14
8	0.304	4 5.504	4 507.40
9	0.202	2 5.502	2 506.74
10	0.10	1 5.50	1 506.16
11	0.000	5.50	505.63

由于特征线法需满足柯朗稳定性条件,在距离 步长已确定的情况下,可通过计算确定时间步长。

由柯朗稳定性条件得: t

198

$$\frac{s}{v + \sqrt{g \cdot \frac{A}{B}}}$$
。由于距离

步长不等,此处取步长最小值 s = 505.63 m,即第 10~11 断面的距离。按第 11 断面计算水力要素, 得到 $A = 118.25 \text{ m}^2$,B = 38 m,v = Q/A = 0.2537m/s,故 t 87.5 s,根据柯朗稳定性条件取时间步 长 t = 60 s。

2.1 下游常水深、上游流量改变时主要水力参数变 化过程的模拟

模型渠段下游常水深运行时,通过调节其上游 端闸门开度 G。来调节流量。上游端闸门门前水深 (即模型渠段的上游渠段下游端水深) h_z = 6.312 m, 闸门下游端(即渠段第一计算断面)水深为 h_i = 4.500 m,上游渠段也为下游常水位运行,故 h_z视为 不变。采用的模拟条件为 :渠段上游引水流量在调 节持续时间 t = 20 min 内从 30 m³/s 分别增大 Q = 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 m³/s 后维持不变。由于流量 为线性增大,其表达式可按式(10)表示⁽³⁾(下游水深 维持 $h_{11} = 5.500$ m 不变):

$$Q(t) = \begin{cases} Q_{o} & t & t_{0}, \\ Q_{0} + \frac{Q}{t}(t - t_{0}) & t_{0} & t & t_{1}, \\ Q_{1} & t & t_{1}, \end{cases}$$
(10)

分析模拟条件下主要水力要素的变化过程。图 4 是渠段下游流量过渡过程,在 t = 300 min 时已基 本稳定;图 5 为渠段上游水深过渡过程,同样在t = 300 min 时基本达到稳定。

在 0~25 min 闸门开度过程如图 6 所示。初始 时闸门开度 $G_a = 1.595$ m,闸门上、下游水深分别为 $h_c = 6.312$ m, $h_1 = 4.500$ m。按 Swamee⁽⁸⁾提出的 判别闸孔出流状态的经验式,则初始时闸孔出流为 自由流。闸门由于引水流量变化开始调节后,其开 度均随时间几乎呈直线变化,未出现折点,说明闸门 开度增加的过程中也均为自由出流,这一点可以从 最大闸门开度时的出流状态得到验证,程序模拟出 最大闸门开度(对应流量变幅为 20.0 m³/s)为 $G_a =$ 2.212 m,在闸门开度调到此开度后,渠段上游端水 深出现的最大值为 $h_1 = 4.616$ m,故经验判别式仍 成立,闸孔出流一直为自由出流。

对图 6 所示的闸门开度变化曲线按线性函数拟 合,可得:

 $Q = 5.0 \text{ m}^3 / \text{ s}$ 时, $G_o = 0.009 1 t + 1.593 5$, $R^2 = 0.999 9$;

 $Q = 10.0 \text{ m}^3$ / s 时, $G_o = 0.017 3t + 1.597 9$, $R^2 = 0.999 4$;

 $Q = 15.0 \text{ m}^3 / \text{ s}$ 时, $G_o = 0.024 7t + 1.605 9$,

 $R^2 = 0.9994;$ $Q = 20.0 \text{ m}^3 / \text{ s}$ 时, $G_0 = 0.0309t + 1.6191,$ $R^2 = 0.9959_{\circ}$

为了反映闸门在整个模拟时段内(0~360 min) 开度随时间的变化过程,做出模拟曲线如图7所示, 在调节时段(t=20 min)外,闸门开度 G。随时间还













在流量调节时段(t = 20 min)内,4 种流量变幅 ($Q = 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 \text{ m}^3$ /s)情况下闸门过流 流量系数 c_a 随时间延长也几乎呈线性增加(图 8); 但在流量调节时段以后,流量系数 c_a 稍有波动,这 种波动随时间延长逐渐减弱,最后趋于稳定值(图 9)。渠段上游闸门流量系数与闸门开度的关系也几 乎呈线性规律变化(图 10)。 有小幅波动(最后趋于稳定),且流量变幅越大,波动 越强烈。这种波动随时间逐渐减弱,最后流量系数 趋于稳定值 G_{稳定},此值较 t = 20 min 时的闸门开度 值 G_{调节}小。这种开度的小幅波动在实际的调闸中 一般不允许出现,因为频繁调整闸门开度对闸门不 利。



图 5 下游常水深、上游流量线性增大时渠段 上游水深的过渡过程





- 图 7 下游常水深、上游流量线性增大时渠段上游 闸门开度随时间的变化过程(0~360 min)
- Fig. 7 Variation graph of upstream gate opening under constant downstream water depth and upstream discharge increasing in linear mode (0 - 360 minute)
- 2.2 下游常水深、上游闸门调控时流量和水深变化 过程的模拟

在实际的渠段运行过程中,下游需水流量或上 游引水流量的变化多是通过闸门开度的调节来实现 的。本文在模拟闸门开度变化引起渠道水流过渡 时,闸门开度变化的设定为一定时间内线性增大或 减小,而后保持稳定不变。因为一般机械闸门或手 动闸门的调节可表示为开度变化量 G。随时间 t 变 化的线性函数,即以某一比较均匀的速度增大或减 小闸门开度,这样比较简单,而且可以避免过快速度 调节闸门时带来的水流状态的急剧变化。闸门开度 的调节量将以流量稳定时闸门开度为准推算。模拟 前给定闸门开度增大的线性表达式为

 $G_o = k \cdot t + g$,

式中:k为闸门单位时间的开度调节,m/s;g为闸门 调节前的开度,m;t为调节时间,min。为便于比较



图 8 下游常水深、上游流量线性增大时渠段流量系 数随时间的变化过程(0~25 min)

Fig. 8 Variation graph of gate discharge coefficient under constant downstream water depth and upstream discharge increasing in linear mode (0 - 25 minute)





同样模拟闸门开度增大的情况,选取流量变幅 为 $Q = 10.0 \text{ m}^3/\text{ s}$ 和 20.0 m³/s。由以上模拟可 知,这两种流量变幅情况下闸门开度的稳定值分别 为: $G_a = 1.919 \text{ m}$ 和 $G_a = 2.165 \text{ m}$ 。参考图 6 所示 的闸门开度随时间变化曲线的线性拟合结果,给出 和说明,所取的闸门开度线性表达式参考 2.1 部分 模拟出的闸门开度曲线,这样既可以保证选择合适 的闸门开度线性调节函数式(即斜率 k、截距 g 和时 间 t),又便于比较。另外,线性函数式中截距是通过 以上模拟出的闸门最后稳定时的开度,而不是以 20 min 时的闸门开度来确定的,这样闸门调控的流量 更接近于目标流量。



图 9 下游常水深、上游流量线性增大时渠段流量 系数随时间的变化过程(0~360 min)

Fig. 9 Variation graph of gate discharge coefficient under constant downstream water depth and upstream discharge increasing in linear mode (0 - 360 minute)





闸门开度随时间调节的线性分段函数如下: $Q = 10.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, $G_{ol} = 0.017t + 1.579, 1 t 20$, $G_{ol} = 1.919 \text{ m}, t > 20$; $Q = 20.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, $G_{a2} = 0.030t + 1.545, 1 t 20$, $G_{a2} = 2.165 \text{ m}, t > 20_{o}$ 渠段下游维持常水深、下游闸门在 *t* = 20 min 内 分别按上述两种情况增加开度,而后保持开度不变, 模拟出渠段上、下游流量过渡过程分别如图 11 和 12 所示。两种闸门开度增加情况下均为自由出流(未出



图 12 开度调节函数为 Ga 时渠段上、下游 流量过渡过程

Fig. 12 Transition graph of upstream and downstream discharge under gate opening regulating function G_{c2}

3 结论与讨论

本文对闸门调控下的单一渠段、下游常水深运 行时的非恒定流过渡过程进行了初步研究。采用矩 形网格特征线法对非恒定流进行了数值模拟,结果 表明:

(1)下游流量 Q11和上游水深 hi 经历一段时间 都趋于稳定,而且流量趋近的稳定值即为渠段另一 端流量调节的目标值;从流量和水位过渡过程产生 的波动和趋于稳定所需的时间看,初始流量和调节 时间相同时,流量变幅越大,引起的渠段水流(流量 和水深)波动越大,趋于稳定的时间也越长。闸门处 流量系数 ca,由于受闸门开度 Ga 及闸门上、下游水 深等因素影响是实时变化的,因而确定 ca 并不容 易。但是,闸门开度的调节必须建立在实时获得闸 门处流量系数 ca 信息的基础上。在流量调节时段 内,流量系数 ca 基本呈线性规律变化;在流量调节 时段外,流量系数 ca 仍有波动,且流量变幅越大,流 量系数 ca 的变化也越大,随着闸门上游端水深趋于 稳定,流量系数 ca 的变化也逐渐减弱,最后该系数 趋于一个稳定值。 现自由流向淹没流过渡),渠段下游流量在*t*=20 min 内均基本按线性规律变化,而后基本维持稳定;而上 游流量经过一段时间的波动后,均基本趋于下游流 量值。渠段上游水深过渡过程如图 13 所示。





Fig. 13 Transition graph of upstream water depth under different gate opening regulating function

(2) 闸门开度按本文给出的线性函数式调节时,

闸孔过流流量、上游水深基本按线性规律变化,而后 基本维持稳定不变。

本文定性分析结果较为可靠,但有必要通过物 理模型进行进一步定量检验。

[参考文献]

- [1] 吕宏兴. 灌溉渠道流量优化调度与水力模拟研究 [D]. 陕西杨 凌:西北农业大学水利与建筑工程学院, 1999.
- [2] 康绍忠,许 迪. 我国现代农业节水高新技术发展战略的思考[J]. 中国农村水利水电,2001(10):25-29.
- [3] 吕宏兴,宋松柏,马孝义,等. 灌溉渠道闸门调控过程中的非恒 定流研究[J].农业工程学报,2002,18(6):18-22.
- [4] 李明思,朱凤书.灌溉输配水渠系水量调控的研究[J].灌溉排 水,2000,19(3):77-80.
- [5] 吕宏兴,裴国霞,杨玲霞.水力学[M].北京:中国农业出版社, 2002:338-361.
- [6] 徐正凡.水力学[M].北京:高等教育出版社,1984:255-341.
- [7] 李明思. 灌溉渠道流量与水量调控技术研究[D]. 陕西杨凌:西 北农业大学水利与建筑工程学院,1992.
- [8] Swamee P K. Sluice-gate discharge equations[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1992, 118 (1): 56-60.