

文章编号:0559-9350(2018)08-0907-10

基于流态辨识的弧形闸门过流计算

郭永鑫¹, 汪易森², 郭新蕾¹, 胡玮³, 朱锐³

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 国务院南水北调工程建设委员会专家委员会, 北京 100038; 3. 南水北调工程建设监管中心, 北京 100038)

摘要: 过闸流量的精确计算是实现调水工程闸门自动控制、调度运行系统仿真和工程适时、适量供水的重要前提。在闸后收缩断面为低弗劳德数(约 $Fr < 1.7$)的淹没孔流条件下, 现有弧形闸门过流计算的经验系数模型和量纲分析模型流量预测误差较大。基于已有试验数据分析, 研究提出了闸孔淹没出流的高 Fr 区和低 Fr 区的流态辨识参数——综合能耗系数 Er , 定义为相对开度 e/H 和潜流比 Xr 之和, 即 $Er = e/H + Xr$, 相应的流态辨识方法为: $Er < 1$ 为高 Fr 的部分淹没孔流, $Er \geq 1$ 为低 Fr 的完全淹没孔流。针对闸孔出流的不同流态, 即自由孔流、部分淹没孔流和完全淹没孔流, 分别建立相应的流量计算模型, 采用最小二乘辨识进行模型参数的估计, 实例验证表明流态辨识模型整体的预测精度较高, 80%预测流量的相对误差 $|EQ| < \pm 10\%$, 且 EQ 近似呈正态分布。本文提出的流态辨识方法和计算模型为过闸流量的精确计算提供了新的思路和方法。

关键词: 弧形闸门; 流量计算; 淹没出流; 流态辨识; 最小二乘法

中图分类号: TV663

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20171188

1 研究背景

弧形闸门具有重量轻、启门力小、动态稳定性好、操作和维护简单等优点, 被广泛应用于水利工程中, 作为控制渠道水位和流量的节制建筑物。过闸流量的精确计算是实现闸门自动控制、调度运行系统仿真和保障工程适时、适量供水的前提条件。

目前, 工程常用的过闸流量计算模型可归纳为两种: 经验系数模型和量纲分析模型。

(1) 经验系数模型。该模型是现有工程设计中的常用模型, 其流量计算公式可写为:

$$Q = \mu e b \sqrt{2gH} \quad (1)$$

式中: Q 为过闸流量; μ 为流量系数; e 为闸门开度; b 为闸孔过流宽度; g 为重力加速度; H 为包含行近流速水头的闸前断面总水头, 实际应用中行进流速水头较小, 通常以上游水深 h_1 直接代替 H 。

依据闸孔出流的不同流态: 自由孔流或淹没孔流, 流量系数 μ 采用不同的经验关系式。

设平底板弧形闸门自由孔流的流量系数为 μ_0 , 其经验关系式有:

武汉大学公式^[1-2]:

$$\mu_0 = \left(0.97 - 0.258 \frac{\pi\theta}{180^\circ}\right) - \left(0.56 - 0.258 \frac{\pi\theta}{180^\circ}\right) \frac{e}{H} \quad (2)$$

式中 θ 为弧门开启角, 公式适用范围: $25^\circ < \theta \leq 90^\circ$, $0 < e/H < 0.65$ 。

清华大学公式^[3]:

收稿日期: 2017-12-07; 网络出版日期: 2018-08-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180813.1618.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0405103); 国家“十二五”科技支撑计划(2015BAD24B02); 中国水科院科研专项(HY0145B642017); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室课题(SK12018TS07)

作者简介: 郭永鑫(1978-), 男, 山西阳泉人, 博士, 高级工程师, 主要从事调水工程水力控制研究。

E-mail: Guoyx_1123@163.com

$$\mu_0 = (0.47 + 0.22 \cos^2 \theta) (e/H)^{-0.08} \quad (3)$$

公式适用范围: $15^\circ < \theta \leq 90^\circ$, $0 < e/H < 0.70$ 。

Henry 公式^[4]:

$$\mu_0 = \varepsilon / \sqrt{1 + \varepsilon e/H} \quad (4)$$

式中 ε 为过闸水流的垂向收缩系数。

设弧形闸门淹没孔流的流量系数为 μ_s , 其精确取值一直是水力计算中的难点。国内主要采用在自由孔流流量系数 μ_0 的基础上考虑淹没系数 σ 的影响, 即 $\mu_s = \sigma \mu_0$ 。淹没系数 σ 的计算通常采用南京水科院提出的淹没系数 σ 与潜流比 Xr 的经验关系^[5], 采用多项式拟合为

$$\sigma = -1.782 Xr^3 + 2.334 Xr^2 - 1.552 Xr + 1 \quad (5)$$

式中: Xr 为潜流比, 定义为 $Xr = (h_3 - h''_c) / (h_1 - h''_c)$; h_1 为上游水深; h_3 为下游水深; h''_c 为相应于收缩断面水深的跃后共轭水深。国外通常采用查图法直接获得淹没孔流的流量系数, 如美国垦务局的 Buyalski^[6] 在大量实验数据的基础上, 给出流量系数 μ_s 与 h_1/P 和 h_3/P (P 为门轴高度) 的关系曲线簇。

经验系数模型能够较好地计算闸孔自由出流, 但对于弧形闸门淹没出流, 由于受闸门型式、渠道结构布置、上下游水流条件等因素的影响, 尚没有普遍、可靠、通用的经验关系式。南京水科院给出的淹没系数 σ 和潜流比 Xr 的经验关系是一种较为简洁的方法, 但实践应用表明, $Xr > 0.8$ 时的计算精度较差^[7]。查图法是经验系数模型的另一种表现形式, 该方法获得的流量系数 μ_s 易受人为因素干扰, 精度较差, 尤其是上下游水位差较小, 且收缩断面的弗劳德数 $Fr < 1$ 时, 流量系数的读取误差较大^[8]。

(2) 量纲分析模型。该模型是一种新的过闸流量计算方法。Ferro^[9] 基于量纲分析的 Π 定理最先提出了平板闸门闸孔出流的无量纲关系式。Shahrokhnia 和 Javan^[10] 基于量纲分析的 Π 定理和不完全自相似理论 (ISS-Incomplete Self Similarity Concept), 给出弧形闸门自由和淹没孔流条件下的无量纲关系式:

自由出流:

$$h_k/e = a_0 (h_1/e)^{b_1} \quad (6)$$

淹没出流:

$$h_k/e = a_0 [(h_1 - h_3)/e]^{b_1} \quad (7)$$

式中: h_k 为矩形渠道的临界水深, $h_k = (q^2/g)^{1/3}$; q 为闸孔单宽流量; a_0 、 b_1 为待定系数, 采用 Buyalski 的试验数据进行拟合可得, 自由出流 $a_0 = 0.88$, $b_1 = 0.40$, 淹没出流 $a_0 = 1.14$, $b_1 = 0.33$ 。Bijankhan^[11] 引入能够唯一表征淹没出流流态特征的跃后共轭水深 h''_c , 提出新的弧形闸门淹没出流的无量纲水位-流量关系式

$$\frac{h_k}{e} = a_0 \left(\frac{h_1}{e} \right)^{b_1} \left[\frac{(h_1 - h_3)}{\lambda (h_3 - h''_c) + (h_1 - h_3)} \right]^{b_2} \quad (8)$$

式中: a_0 、 b_1 、 b_2 、 λ 为待定系数, 对于不同的闸门, 系数取值不同, 需根据实际运行数据进行率定。

量纲分析模型的结构形式简单, 计算便捷, 但对于不同的闸门其待定系数值不同, 需根据现场实测数据重新率定, 在工程设计阶段不易使用; 且现有模型的考虑因素不全面, 如弧形闸门自由出流的无量纲关系式 (6) 仅包含闸门的相对开度, 而没有考虑闸门开启角 θ 的影响。

此外, 现有过闸流量计算模型在工程应用中还存在以下问题:

(1) 采用固定不变的相对开度 e/H 值判别“孔流”和“堰流”, 没有能够考虑闸门型式、上下游水流边界等对过闸水流的影响。侯冬梅等^[12] 试验研究和理论分析认为, 以固定值 $e/H = 0.65$ 作为孔堰流变换分界值仅适用于闸孔自由出流状态, 当 $e/H > 0.65$ 而弧门未脱离水面时, 传统堰闸经验公式计算的流量与实测值偏差较大。杜屿等^[13] 分析现场率定和模型试验资料指出, 孔堰流变换分界 (e/H) 值与堰型、闸门型式、上下游水头、流量系数等多种水力因素有关, 并不是一个固定值。袁新明^[14] 结合工

程实际分析指出, 堰闸出流的淹没界限不仅受相对开度 e/H 的影响, 而且上下游水位对其有重要的影响, 对于上下游水位差很小的水闸, 在 $e/H > 0.65$ 时, 只要下游水深超过闸门开度一定值也会出现闸孔淹没出流。

(2) 对闸孔淹没出流的流态缺乏进一步的认识和划分。黄国兵等^[15] 试验研究指出, 淹没系数经验公式(5)的适用范围为: $1.7 < Fr < 9$, 其中 Fr 为孔流收缩断面的弗劳德数, 当节制闸相对开度 e/H 较大时收缩断面 Fr 数接近于 1, 此时采用传统经验系数模型计算的流量与实测值有较大偏差。袁新明^[16] 考虑收缩断面 Fr 数, 理论分析给出了平底板平板闸门不同流态下淹没出流的判别条件。邱静^[17] 依据模型试验结果, 采用淹没度 h_3/e (下游水深 h_3 与闸门开度 e 的比值) 作为判别条件, 对宽顶堰平板闸门闸孔出流的流态进行划分: 当 $1 < h_3/e \leq 5.1$ 时, 为不完全淹没出流, 淹没出流的流量系数为淹没度 h_3/e 的函数; 当 $5.1 < h_3/e$ 时, 为完全淹没出流, 流量系数为一常数。美国陆军工程兵团水文工程中心开发的水力计算软件 HEC-RAS 中依据下游水深 h_3 和上游水深 h_1 的比值将过闸水流粗略划分为: 自由孔流 ($h_3/h_1 \leq 0.67$), 部分淹没孔流 ($0.67 < h_3/h_1 < 0.8$) 和完全淹没孔流 ($h_3/h_1 \geq 0.8$)^[18]。

本研究在实例分析现有过闸流量计算模型误差的基础上, 基于过闸水流的消能机理给出闸孔淹没出流的流态辨识参数和方法, 进一步分析不同流态下流量系数的主要影响因素, 建立相应的计算模型结构, 采用最小二乘法优化拟合模型参数, 并进行实例验证。

2 现有闸孔出流模型分析

2.1 试验数据 为进一步辨识闸孔出流的不同流态特征, 采用现有工程常用的经验系数模型和量纲分析模型对文献[6] Buyalski 提供的弧形闸门试验数据进行分析。试验用弧形闸门的半径 $R=702$ mm, 闸孔宽度 $b=711$ mm, 门轴高度 P 分别为 409、461 和 511 mm, 底缘型式为硬橡胶条密封, 试验流量 Q 范围从 2.7 L/s 到 316 L/s, 闸门相对开度 e/H 范围从 0.055 到 0.970, 过闸流态复杂多样(包括自由孔流、收缩断面 Fr 从 0.2 到 5.8 的淹没孔流), 试验数据丰富(约 1890 组数据)。

2.2 计算模型 自由孔流和淹没孔流的判别条件为: ① $h_3 \leq h''_c$ 为自由孔流; ② $h_3 > h''_c$ 为淹没孔流。跃后共轭水深 h''_c 的计算式为^[1]:

$$h''_c = 0.5h_c \left(\sqrt{1 + 16\varphi^2 \left(h_1/h_c - 1 \right)} - 1 \right) \quad (9)$$

式中: h_c 为闸后收缩断面水深, $h_c = \varepsilon e$; φ 为收缩断面的流速系数, 对于平底板闸门可近似取 $\varphi=0.97$ 。

经验系数模型采用国内工程设计常用的经验关系式: 自由孔流采用武汉大学推荐的经验关系式(2), 淹没孔流采用南京水科院给出的淹没系数 σ 和潜流比 Xr 的经验关系式(5)。

量纲分析模型采用 Bijankhan 给出的无量纲关系式及相应的拟合系数^[11]: 自由孔流采用无量纲关系式(6), 淹没孔流采用无量纲关系式(8), 不同闸门的拟合系数见表 1。

表 1 量纲分析模型的拟合系数

闸门名称	门轴高度/mm	自由孔流		淹没孔流			
		a_0	b_1	a_0	b_1	b_2	λ
闸门 1	461	0.808	0.434	0.618	0.513	0.319	1.388
闸门 2	511	0.801	0.442	0.632	0.511	0.331	1.323
闸门 3	409	0.797	0.430	0.614	0.502	0.321	1.366

2.3 结果分析 为便于分析说明, 给出如下参数定义:

闸后收缩断面的弗劳德数 Fr :

$$Fr = \sqrt{q^2 / (g\varepsilon^3 e^3)} = \mu \sqrt{2h_1 / (\varepsilon^3 e)} \quad (10)$$

预测流量的相对误差 $EQ(\%)$:

$$EQ = (Q_{\text{预测}} - Q_{\text{实测}}) / Q_{\text{实测}} \times 100\% \quad (11)$$

过闸水流的相对水头损失 $\eta(\%)$:

$$\eta = (h_1 - h_3) / h_1 \times 100\% \quad (12)$$

由于现有模型预测流量的相对误差 EQ 为偏态分布,因此主要采用分位数结合箱形图对 EQ 进行统计和评价,经验系数模型和量纲分析模型的流量预测结果分析如下:

(1)自由孔流条件下,两种模型80%数据的预测流量相对误差 $|EQ| < 8\%$,预测精度较好,误差分布见图1(a), $|EQ|$ 较大的数据分布在自由孔流到淹没孔流的过渡区间。

(2)淹没孔流条件下,两种模型预测流量的相对误差 EQ 均呈偏态分布(见图1(b)),并且随收缩断面 Fr 的减小而增大, $|EQ| > 20\%$ 的数据主要集中在低弗劳德数(约 $Fr < 1.7$)区域(见图2)。大量研究表明 $Fr=1.7$ 为波状水跃的上限弗劳德数^[19],此时水流表面轻微波动,水跃的消能效果不明显。

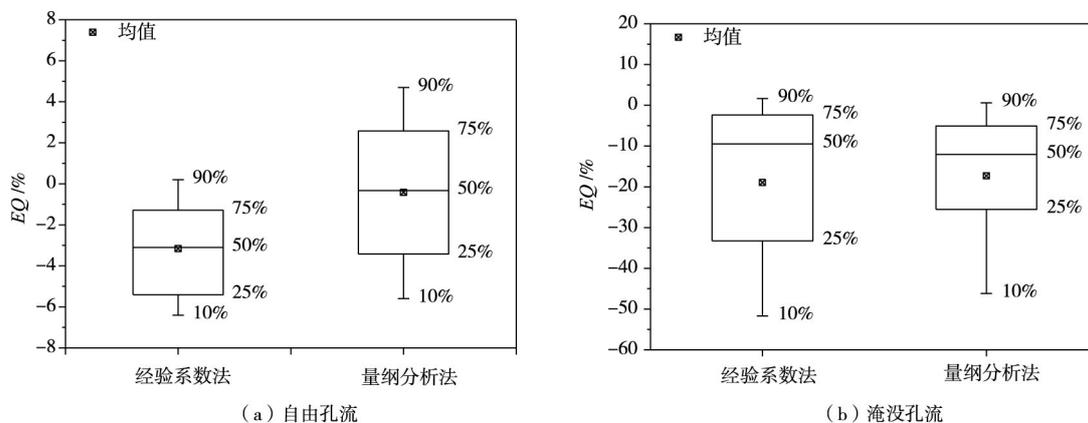


图1 预测流量相对误差 EQ 的箱形图

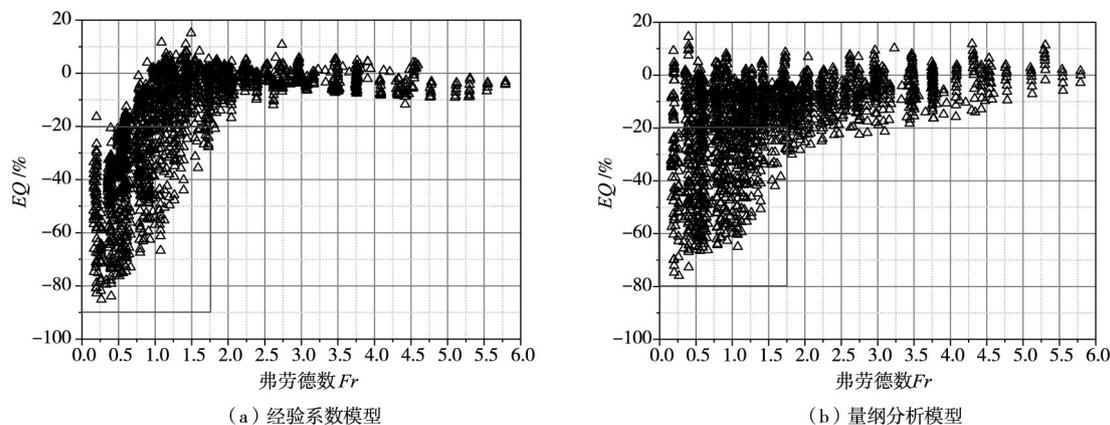


图2 淹没孔流的 EQ 随 Fr 的变化关系

(3)将淹没孔流条件下 $|EQ| > 20\%$ 的数据提取出来,绘制其相对开度 e/H 和潜流比 Xr 的分布关系,如图3所示,可知低 Fr 的大误差数据具有如下特征之一:①闸门相对开度 $e/H > 0.5$,此时,过闸水流边界条件接近于堰流,闸门对水流的约束较弱,但由于下游较高水位的影响,易形成低 Fr 的闸孔淹没出流;②潜流比 $Xr > 0.8$,或 $(h_1 - h_3) / (h_1 - h_c) < 0.2$,此时,下游水位较高,即使相对开度 $e/H < 0.5$,但由于大的水跃淹没度,闸后水跃掺混不充分,消能率低。

综上所述,现有闸孔出流计算模型,无论是经验系数模型还是量纲分析模型,对自由孔流和收缩断面高弗劳德数($Fr > 1.7$)的淹没孔流,均能够进行很好的预测模拟,但是不适用于低弗劳德数($Fr < 1.7$)、低消能率的淹没孔流。显然,对于闸孔淹没出流有必要根据不同的出流流态,即收缩断面的 Fr ,采用不同的水位-流量关系。

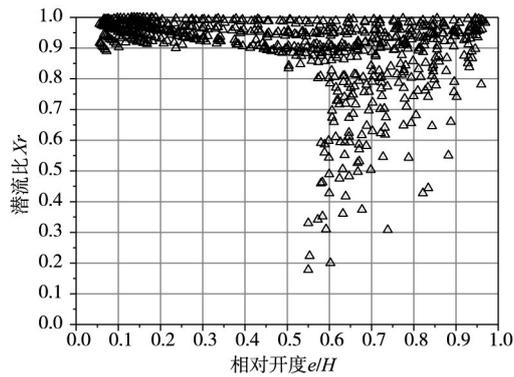


图3 经验系数模型 $|EQ|>20\%$ 的 e/H 和 X_r 分布

3 基于流态辨识的弧形闸门过流计算

如何根据闸门的已知运行条件(包括上游水深 h_1 、下游水深 h_3 、闸门开度 e 等)预判闸孔淹没出流的流态(即收缩断面的 Fr 大小)及如何建立不同过闸流态下的水位-流量关系是过闸流量精确计算需解决的两个关键问题。

3.1 闸孔出流的流态辨识 淹没出流条件下过闸水流的水头损失主要包括两部分:(1)闸门边界阻力产生的水头损失,其与闸门相对开度 e/H 有关,随着 e/H 的增大而减小;(2)闸后水跃紊动产生的水头损失,其与收缩断面的 Fr 有关,随着 Fr 的增大而增大,同时收缩断面的 Fr 随着下游水跃淹没度(可用潜流比 X_r 唯一表示)的增大而减小,即水跃紊动引起的水头损失随着潜流比 X_r 的增大而减小。据此,尝试引入一新的无量纲参数——综合能耗系数 Er ,定义为 $Er=e/H+X_r$,表示闸门边界阻力(代表参数为相对开度 e/H)和闸后水跃(代表参数为潜流比 X_r)对过闸流水头损失的综合影响。

图4为闸孔淹没出流条件下综合能耗系数 Er 与收缩断面 Fr 的分布关系,由图可知,随着综合能耗系数 Er 增大, Fr 减小,并且在综合能耗系数 $Er=1$ 附近出现较明显的分界:综合能耗系数 $Er<1$ 时 Fr 较大(约 $Fr>1.5$),闸后可近似形成完全水跃,水流紊动和掺混作用剧烈,水跃的消能效果显著,相对水头损失 $\eta>15\%$;综合能耗系数 $Er>1$ 时 Fr 较小(约 $Fr<1.5$),过闸水流为波状水跃或无水跃,闸后水流掺混不强烈,水跃的消能率极低,上下游水头损失主要为闸门边界阻力引起的局部水头损失,相对水头损失 $\eta<15\%$ 。图5为综合能耗系数 $Er>1$ 时相对开度 e/H 和潜流比 X_r 的分布,其数据范围涵盖闸门相对开度 $e/H>0.5$ 和潜流比 $X_r>0.8$ 的大部分数据,这也是现有模型中 $|EQ|$ 较大的低 Fr 区域(如图3所示)。

以综合能耗系数 Er 作为预测和划分淹没孔流流态的辨识参数,给出闸孔出流不同流态的辨识方法:① $h_3 \leq h''_c$ 为自由孔流;② $h_3 > h''_c$,且 $Er < 1$ 为部分淹没孔流,收缩断面的 $Fr > 1.5$,闸后近似为完

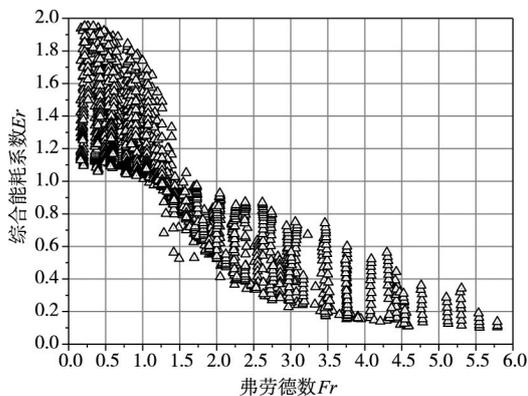


图4 淹没孔流的 Fr 和 Er 的关系

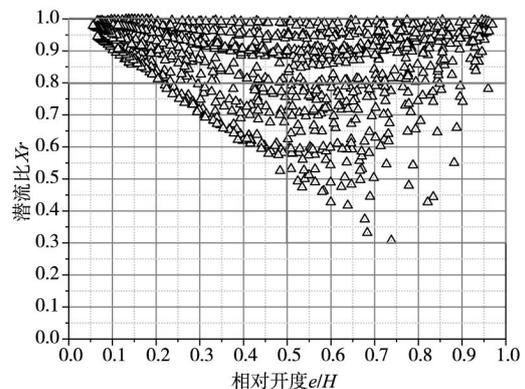


图5 综合能耗系数 $Er>1$ 的 X_r 和 e/H 分布

全水跃；③ $h_3 > h''_c$ ，且 $Er \geq 1$ 为完全淹没孔流，收缩断面的 $Fr < 1.5$ ，闸后为波状水跃或无水跃。上游水位 h_1 和闸门开度 e 一定的条件下，随着下游水位 h_3 的增加，水流流态依次经历：自由孔流 → 部分淹没孔流 → 完全淹没孔流（如图6）。

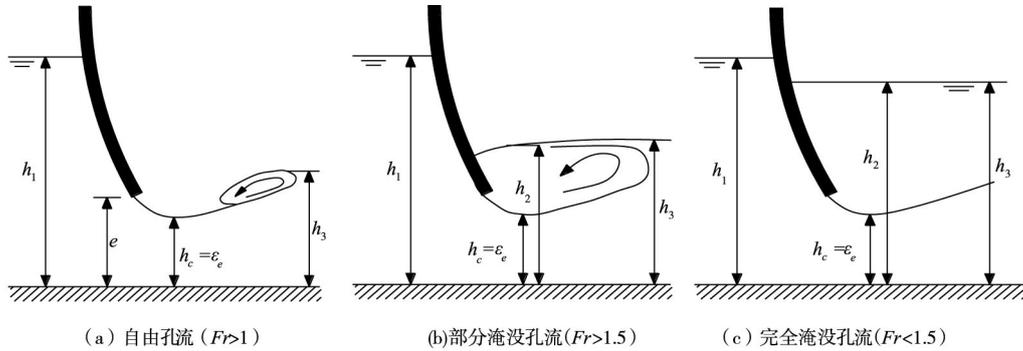


图6 闸孔出流的流态

3.2 不同流态的模型结构 对于闸孔出流的不同流态，流量系数的影响因素也不同，应分别采用不同的计算模型结构。大量现场率定和模型实测资料表明，流量系数关系采用幂函数形式更能符合流量测算的实际情况^[20-21]。

(1) 自由孔流。根据已有试验数据和经验关系模型，弧形闸门自由孔流的流量系数 μ_0 与闸门开启角 θ ($\cos\theta = (P-e)/R$) 和相对开度 e/H 有关，其计算模型可假定为如下结构形式

$$\mu_0 = f\left(\frac{P-e}{R}, \frac{e}{H}\right) = a_0 \left(\frac{P-e}{R}\right)^{b_1} \left(\frac{e}{h_1}\right)^{b_2} \quad (13)$$

(2) 高 Fr 的部分淹没孔流。综合能耗系数 $Er < 1$ ，弗劳德数较大 ($Fr > 1.5$)，闸后水跃紊动、掺混作用强烈，消能效果显著，上下游水头损失不仅包含闸门边界引起的局部水头损失，而且包含淹没水跃剧烈紊动、掺混所产生的水头损失，此时，淹没系数 σ 与潜流比 Xr 的相关性较好，如图7。因此，部分淹没孔流的流量系数 μ_s 与闸门开启角 θ 、相对开度 e/H 和潜流比 Xr 有关，其计算模型可假定为

$$\mu_s = f\left(\frac{P-e}{R}, \frac{e}{H}, 1 - Xr\right) = a_0 \left(\frac{P-e}{R}\right)^{b_1} \left(\frac{e}{h_1}\right)^{b_2} \left(\frac{h_1 - h_3}{h_1 - h''_c}\right)^{b_3} \quad (14)$$

(3) 低 Fr 的完全淹没孔流。综合能耗系数 $Er \geq 1$ ，弗劳德数较小 ($Fr < 1.5$)，过闸水流不能形成充分掺混的水跃，消能效果不显著，上下游水头损失主要为闸门边界阻力引起的局部水头损失。对上下游断面建立能量方程进行分析可知，下游断面的流速系数 φ 与相对开度 e/H 的相关性较好，如图8。

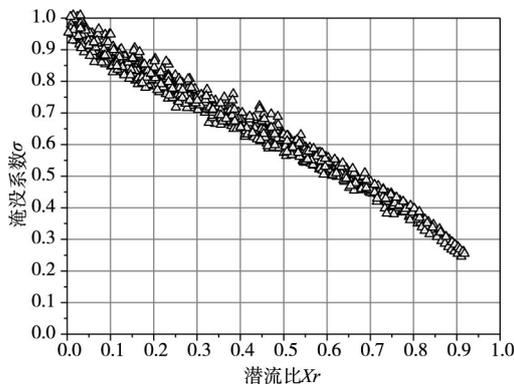


图7 高 Fr 部分淹没孔流的 Xr 与 σ 的关系

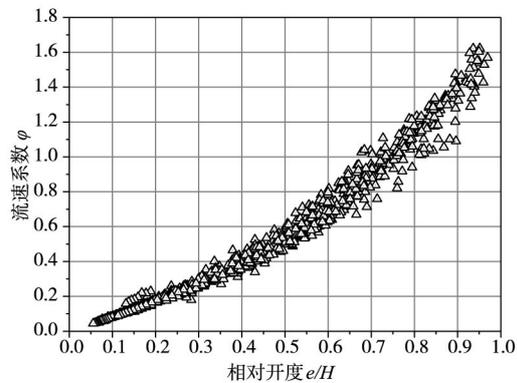


图8 低 Fr 完全淹没孔流的 φ 与 e/H 的关系

因此，完全淹没孔流的流量系数 μ_s 与相对开度 e/H 和相对水头损失 η 有关，其计算模型可假定为

$$\mu_s = f\left(\frac{e}{H}, \frac{h_1 - h_3}{h_1}\right) = a_0 \left(\frac{e}{h_1}\right)^{b_1} \left(\frac{h_1 - h_3}{h_1}\right)^{b_2} \quad (15)$$

其中 a_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为待定系数。

3.3 模型参数估计和验证 采用文献[6] Buyalski 的弧形闸门试验数据, 对上述流量系数计算模型中的待定系数进行最小二乘估计^[22], 不同流态的拟合结果如下:

自由孔流:

$$\mu_0 = 0.592 \left(\frac{P-e}{R} \right)^{0.151} \left(\frac{e}{h_1} \right)^{-0.125} \quad (16)$$

部分淹没孔流:

$$\mu_s = 0.553 \left(\frac{P-e}{R} \right)^{0.140} \left(\frac{e}{h_1} \right)^{-0.107} \left(\frac{h_1-h_3}{h_1-h''_c} \right)^{0.60} \quad (17)$$

完全淹没孔流:

$$\mu_s = 1.207 \left(\frac{e}{h_1} \right)^{0.313} \left(\frac{h_1-h_3}{h_1} \right)^{0.465} \quad (18)$$

将流态辨识模型与经验系数模型和量纲分析模型的流量预测结果进行比较, 见表 2 和图 9、图 10。

表 2 不同模型预测流量相对误差 EQ 的参数统计

流态	模型	分位数					均值
		10%	25%	50%中位数	75%	90%	
自由孔流	经验系数	-6.404	-5.408	-3.100	-1.289	0.202	-3.159
	量纲分析	-5.560	-3.425	-0.326	2.579	4.695	-0.420
	流态辨识	-3.374	-2.061	0.378	1.605	2.750	0.088
高 Fr 部分淹没孔流	经验系数	-9.773	-5.976	-2.965	0.428	2.839	-3.423
	量纲分析	-19.738	-13.561	-7.596	-2.371	2.027	-8.259
	流态辨识	-6.551	-2.872	0.149	2.674	4.623	-0.440
低 Fr 完全淹没孔流	经验系数	-62.512	-46.031	-31.976	-16.467	-5.423	-32.291
	量纲分析	-54.452	-40.116	-21.349	-8.666	-2.411	-25.090
	流态辨识	-15.592	-7.951	-0.216	8.559	14.918	-0.015

(1) 自由孔流, 三种模型的流量预测精度均较好, 80% 预测流量的相对误差 $|EQ| < 7\%$, 其中流态辨识模型的 $|EQ| < 4\%$, 预测结果最优。

(2) 高 Fr 部分淹没孔流 ($Fr > 1.5$, $Er < 1$), 三种模型的流量预测精度均较好, 经验系数模型 80% 的 $|EQ| < 10\%$, 量纲分析模型 80% 的 $|EQ| < 20\%$, 流态辨识模型 80% 的 $|EQ| < 7\%$, 流态辨识模型的预测结果最优, EQ 较大的数据为高 Fr 和低 Fr 的过渡区间。

(3) 低 Fr 完全淹没孔流 ($Fr < 1.5$, $Er > 1$), 现有的经验系数模型和量纲分析模型的 EQ 较大, 经验系数模型 80% 的 $|EQ| < 65\%$, 量纲分析模型 80% 的 $|EQ| < 55\%$, 这是由于模型没有对淹没孔流的流态进行细分, 对低 Fr 的淹没出流使用同高 Fr 相同的计算公式, 然而两种流态下水头损失的机理不同, 高 Fr 区主要为水跃消能, 低 Fr 区为闸门边界阻力消能, 相应的流量计算也应采用不同的公式。流态辨识模型对低 Fr 完全淹没孔流单独建立计算公式, 预测精度较高, 80% 数据的 $|EQ| < 15\%$, $|EQ|$ 较大的数据潜流比 $Xr \rightarrow 1$, 该区域上下游水头差较小, 由于水位测量误差引起的流量不确定度较大。

流态辨识模型以综合能耗系数 $Er=1$ 为分界值对淹没孔流的流态进一步辨识, 分别给出适用于自由孔流、部分淹没孔流和完全淹没孔流的计算模型, 采用最小二乘法进行模型参数的估计, 实例验证表明模型整体的预测精度较高, 80% 的 $|EQ| < 10\%$, 且 EQ 近似呈正态分布, 优于经验系数模型的 $|EQ| < 50\%$, 和量纲分析模型的 $|EQ| < 45\%$ 。

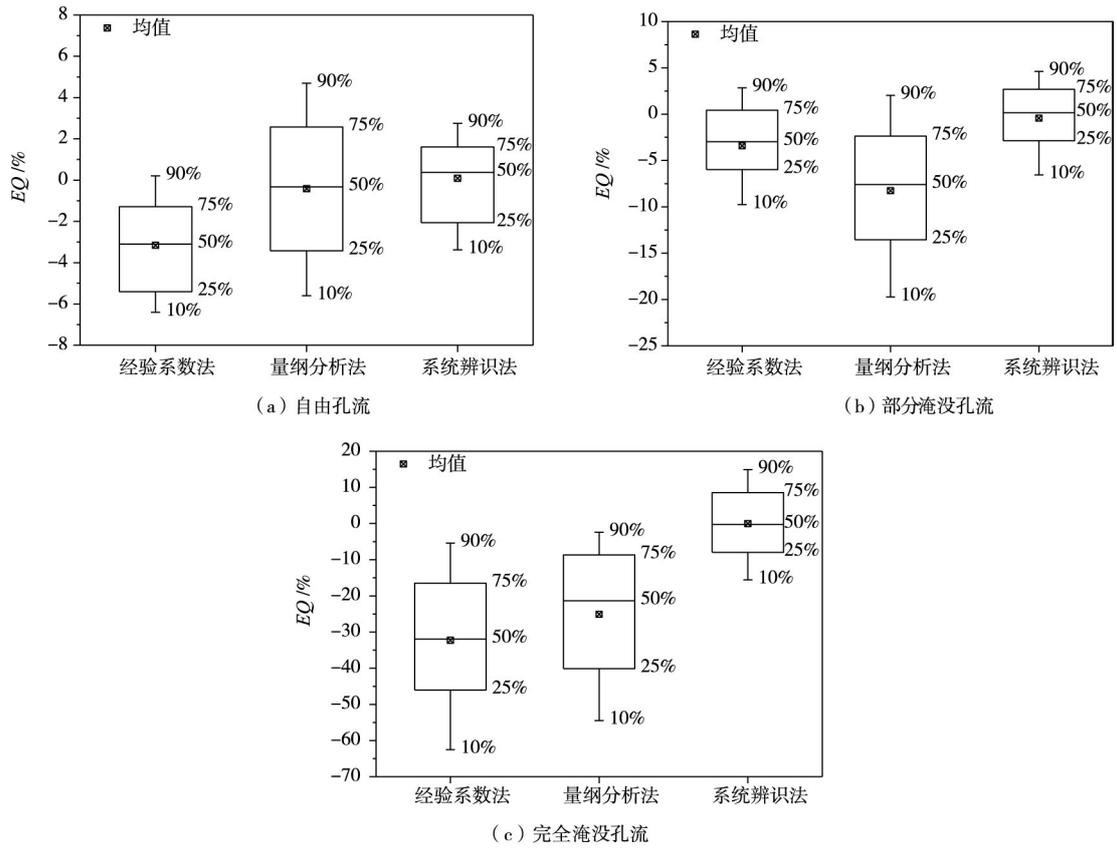


图9 预测流量误差EQ的箱形图

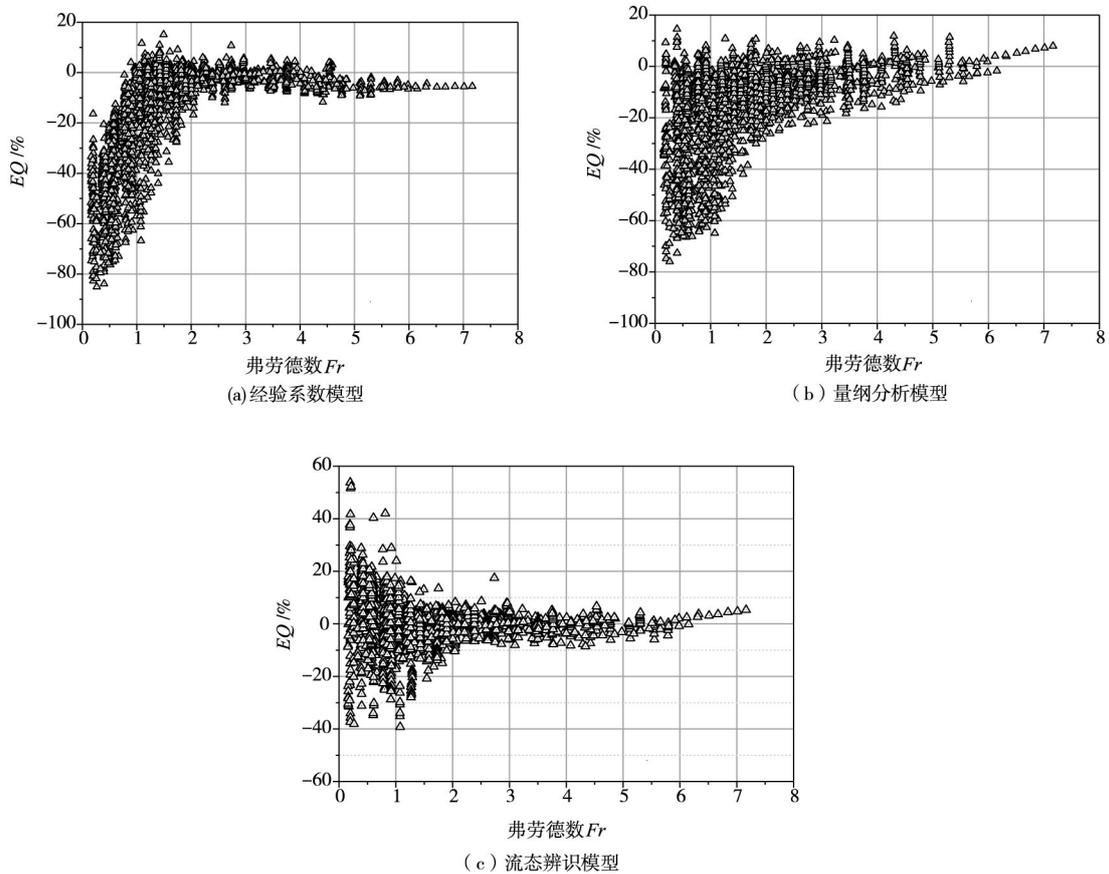


图10 不同模型闸孔出流的EQ随Fr的变化关系 (包含自由孔流、部分淹没孔流和完全淹没孔流)

4 结论

现有弧形闸门过流计算的系数模型和量纲分析模型, 在低 Fr 的淹没孔流条件下(集中于相对开度 $e/H > 0.5$ 或潜流比 $Xr > 0.8$), 流量预测存在较大的误差。研究在分析现有模型各影响因素的基础上, 给出新的流态辨识方法和流量计算模型, 主要成果如下:

(1) 提出了新的闸孔淹没出流的高 Fr 区和低 Fr 区的判别参数——综合能耗系数 $Er = e/H + Xr$, 相应的判别条件为: 综合能耗系数 $Er < 1$ 为高弗劳德数 ($Fr > 1.5$) 的部分淹没出流; 综合能耗系数 $Er > 1$ 为低弗劳德数 ($Fr < 1.5$) 的完全淹没出流。该判据的建立为过闸流量的精确计算提供了理论支撑。

(2) 针对闸孔出流的不同流区, 即自由孔流、部分淹没孔流和完全淹没孔流, 分别建立相应的流量系数计算模型, 采用最小二乘辨识进行模型参数估计。实例验证表明流态辨识模型整体的预测精度较高, 80% 预测流量的相对误差 $|EQ| < 10\%$, 且 EQ 近似呈正态分布, 优于经验系数模型的 $|EQ| < 50\%$, 和量纲分析模型的 $|EQ| < 45\%$ 。

研究所用实例数据为平底板单孔弧形闸门, 此即式(16)一式(18)的适用条件。现实工程中节制闸多为下游渠道变宽的多孔闸门, 且存在不对称开启运行等复杂工况, 此时辨识模型中系数应根据实际运行监测数据重新进行拟合率定, 以保证过闸流量的计算精度, 并为闸门的运行控制、调度决策提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.
- [2] 武汉水利电力学院水力学教研室堰闸水力特性科研小组. 闸孔出流水力特性的研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1974(1): 37-66.
- [3] 清华大学水力学教研组. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.
- [4] HENRY H R. Discussion of "Diffusion of submerged jets" by M. L. Albertson, Y. B. Dai, R. A. Jensen, and H. Rouse[J]. Transaction ASCE, 1950, 115: 687-694.
- [5] 王伟. 平底闸淹没孔流流量系数的初步分析[R]. 南京: 水利部南京水利实验处研究实验报告汇编, 1955.
- [6] BUYALSKI C P. Discharge algorithms for canal radial gates[R]. Research Report REC-ERC-83-9, Bureau of Reclamation, Denver, 1983.
- [7] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 弧形闸门流量计算方法的比较与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(5): 20-22.
- [8] ANKUMIR P. Design of Open-Channels and Hydraulic Structures[M]. Delft University of Technology, 2002.
- [9] FERRO V. Simultaneous flow over and under a gate[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(3): 190-193.
- [10] SHAHROKHNIYA M A, JAVAN M. Dimensionless stage-discharge relationship in radial gates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(2): 180-184.
- [11] BIJANKHAN M, FERRO V, KOUCHAKZADEH S. New stage-discharge relationships for free and submerged sluice gates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(5): 378-387.
- [12] 侯冬梅, 王才欢, 刘毅. 调水工程输水渠道堰闸流量计算方法探讨[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(8): 79-83.
- [13] 杜屿, 杜占德, 王健. 孔堰流变换分界(e/H)值的综合分析[J]. 水文, 1992(4): 28-33.
- [14] 黄国兵, 聂艳华, 段文刚. 南水北调中线工程主要水力学问题研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 34-42.
- [15] 袁新明, 曹邱林. 上下游水位对平底板水闸堰出流淹没界限的影响[J]. 水利学报, 1997(11): 78-84.
- [16] 袁新明, 洪家宝. 平底板水闸孔淹没出流的判别和流量计算[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 1998(3): 69-71.

- [17] 邱静 . 闸孔出流过流量计算公式的研究与应用[C]//第十三届全国水动力学研讨会文集 . 1999 .
- [18] U . S . Hydrologic Engineering Center . Hydrologic Engineering Center – river analysis system (HEC-RAS) : Hydraulic Reference Manual[Z] . 2002 .
- [19] OHTSU I, YASUDA Y, GOTOH H . Hydraulic condition for undular-jump formations[J] . Journal of Hydraulic Research, 2001, 39 (2) : 203–209 .
- [20] 杜屿, 戴荣法, 张世闻 . 闸孔流量系数综合分析[J] . 水文, 1997(5) : 39–45 .
- [21] NASEHI OSKUYI N, SALMASI F . Vertical sluice gate discharge coefficient[J] . Journal of Civil Engineering and Urbanism, 2012, 2(3) : 108–114 .
- [22] 杨开林, 汪易森 . 调水工程闸门特性的动态系统辨识[J] . 水利学报, 2011, 42(11) : 1289–1294 .

New discharge algorithms of radial gates based on the flow regime identification

GUO Yongxin¹, WANG Yisen², GUO Xinlei¹, HU Wei³, ZHU Rui³

(1. *China Institute of Water Resources & Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;*

2. *Construction Committee of South-to-North Water Diversion of State Council, Beijing 100038, China;*

3. *Construction Supervision Center of South-to-North Water Diversion, Beijing 100038, China)*

Abstract: Accurate estimation of flow discharge through radial gates in water diversion projects is an essential precondition for automatic control of gates, simulation of the operation and dispatching system, etc.. The flow discharges predicted by the conventional empirical coefficient model and dimensionless analysis model are of large errors under the submerged flow conditions with low jet Froude number at vena contracta. In this paper, the influence factors of discharge coefficient are analyzed. A new parameter Er is proposed to identify flow regime for submerged flow, which is defined as $Er=e/H+Xr$. When $Er<1$, the submerged flow is of large jet Froude number, and when $Er\geq 1$, the submerged flow is of low jet Froude number. Based on the above flow regime identification, the discharge algorithms are established for free flow, partially submerged flow and totally submerged flow, respectively. Then, the model parameters are estimated by the least squares method. The verifying results show that the discharges predicted by new discharge algorithms are of higher precision. The relative errors $|EQ|$ of 80% tests are less than 10%, and EQ is close to the normal distribution. The flow regime identification criteria and the discharge algorithms proposed in this paper can provide new ideas for the accurate prediction of discharge through gates.

Keywords: radial gate; discharge algorithm; submerged flow; flow regime identification; the least square method

(责任编辑: 李福田)