

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.02.013

过流阻水建筑物在二维平面水动力数值模拟中的处理方法

童朝锋^{1,2}, 孙运佳², 孟艳秋², 邵宇阳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. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于实际过流阻水建筑物的过流特性, 利用内边界法、等效过流糙率修正法和等效过流地形修正法修正过流能力, 以达到与真实过流特征等效的目的。通过应用于二维水动力数值水槽模型, 比较分析3种方法在恒定流和非恒定流条件下的水位及流速计算效果。结果显示, 内边界法和等效过流糙率修正法能如实反映过流阻水建筑物的过流和周围区域的流场特征, 等效过流地形修正法因局部地形变化, 模拟的流速和水位发生突变, 误差相对较大。

关键词: 挡水建筑物; 阻水特性; 内边界法; 等效过流糙率修正法; 等效过流地形修正法

中图分类号: TV691 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)02-0165-06

Methods for processing water-blocking hydraulic structure in two-dimensional hydrodynamic numerical simulation

TONG Chaofeng^{1, 2}, SUN Yunjia², MENG Yanqiu², SHAO Yuyang²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the flow characteristics of an actual water-blocking hydraulic structure, the internal boundary method, the equivalent discharge roughness correction method, and the equivalent discharge topographic correction method were used to correct the discharge capacity, in order to fit the simulated discharge capacity with the actual discharge. Simulation of water level and flow velocity was conducted under the conditions of steady flow and unsteady flow in a two-dimensional hydrodynamic numerical flume model to compare the three methods. The results show that the former two methods can accurately reflect the discharge and the properties of the flow around the water-blocking hydraulic structure, and the water level and flow velocity simulated by the third method, due to the local topographic change, excessively deviated from the actual values.

Key words: water-blocking hydraulic structure; water-resistance effect; internal boundary method; equivalent discharge roughness correction method; equivalent discharge topographic correction method

当水流通过具有过流阻水结构的水工建筑物(如水闸、挡浪板等)时,因受到阻碍作用,过流断面减小,流速及水位发生突变。在以自由表面和静压假定为基础的全场二维平面水动力数值模型中,为保证水动力模型正常运算,需对建筑物进行适当处理,以模拟过流阻水建筑物处的水面突变及过流特征。目前针对具有过流阻水结构的水工建筑物处理方法研究尚少,大多数研究集中于不透水建筑物,如坝体、桥墩、重力式码头等,其主要方法可分为间接模拟法和直接模拟法。间接模拟法将建筑物作为过水区域处理,对其所在区域的网格糙率或高程进行修正^[1-5];直接模拟法是将建筑物作为不透水的岸边界来处理^[6-10]。

为实现在以自由表面假定为基础的二维平面水动力数值模型中对过流阻水建筑物进行数值模拟,根据

收稿日期: 2013-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(51339005);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(2010585312);交通部河口海岸交通行业重点实验室开放课题(KLECE201302)

作者简介: 童朝锋(1973—),男,浙江宁波人,副教授,博士,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: chaofengtong@hhu.edu.cn

建筑物的过流特征,利用3种方法对过流阻水建筑进行概化处理:根据闸孔出流原理,设定建筑物上下游水位差及流量关系作为建筑物上下游内边界条件——内边界法;根据明渠均匀流理论,通过改变底部糙率或修改地形来降低过流能力以模拟建筑物的阻水效应——等效过流糙率修正法(下称糙率法)和等效过流地形修正法(下称地形法)。笔者通过建立二维数值水槽,计算比较3种方法在恒定流和非恒定流情况下水位及流速的变化,分析过流阻水建筑物对水流特征的影响。

1 原理及方法

1.1 内边界法

利用孔流公式,可以得出不同挡水面积下通过建筑物的流量:

$$Q_l = \sigma_s \mu emb \sqrt{2g(H_0 - \varepsilon e)} \tag{1}$$

式中: Q_l ——通过建筑物的总流量; σ_s ——淹没系数; μ ——闸孔自由出流的流量系数; e ——闸门开启高度; m ——闸孔数; b ——闸孔净宽; g ——重力加速度; H_0 ——包括行进流速水头的闸前水头; ε ——垂直收缩系数。

在计算通过建筑物的过流能力时,相关的水动力参数由不设置挡水建筑物的数值模型提供。

将过流阻水建筑物的网格设置为不透水边界,顺水流方向,在建筑物左侧设置流量为 Q_l 的出流边界,建筑物右侧设置流量为 Q_l 的入流边界,即将计算区域分为上游、下游2个区域^[11-12],通过建筑物的实际过流能力作为2个区域间的联系。内边界法保证了建筑物前、后的流量守恒,通过增加内部边界简化了对复杂建筑物的处理,能够真实模拟建筑物的过流特征。

1.2 等效过流糙率修正法

在明渠均匀流中,过水断面单宽流量为

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} H \tag{2}$$

其中

$$R = \frac{A}{\chi}$$

式中: n ——底部糙率; R ——水力半径; i ——底部坡降; H ——水深; A ——过水断面面积; χ ——湿周。

过流阻水建筑物的存在影响了河道过水能力,因此其上下游水位存在一定的水位差 Δh 。根据能量守恒原理,可以通过增加底部糙率,将因建筑物阻碍作用导致的水头损失转化为底部应力增加引起的能量损耗。假定在一定虚拟长度 L 内,水流的水头损失为 Δh ,则水力坡降为

$$J = \frac{\Delta h}{L} \tag{3}$$

在明渠均匀流中底部坡降与水力坡降近似一致,即 $i=J$ 。由式(2)和式(3)可以得到在此虚拟长度内的当量糙率:

$$n_s = \frac{R^{\frac{2}{3}} h^{\frac{1}{2}} H}{L^{\frac{1}{2}} Q} \tag{4}$$

此时的糙率已经不能真实反映底部的粗糙程度,而是一个综合的阻力因子。

1.3 等效过流地形修正法

地形法可以分为等过水面积法^[7]和等过水流量法^[3]。地形法是通过抬高底部高程,改变河道的水力半径,从而降低河道的过水能力,使等效后的过水能力与建筑物影响下的过水能力一致。

矩形过水断面的水力半径为

$$R = \frac{Hd}{2H + d} \tag{5}$$

式中: d ——河道宽度。

由式(2)、式(4)和式(5)可得

$$\left(\frac{Hd}{2H + d}\right)^{\frac{2}{3}} H = \frac{QnL^{\frac{1}{2}}}{\Delta h^{\frac{1}{2}}} \tag{6}$$

通过数值求解可以得到 L 范围内的 H 。

2 方法应用

通过建立正交网格的二维数值水槽,计算分析3种方法在恒定流和非恒定流情况下建筑物附近水位及流速的变化,以探讨各方法模拟过流阻水建筑物对水流特征影响的效果。

2.1 建立数值水槽

数值水槽宽为40 m,长为20 000 m,水深统一为5 m,底部糙率取0.02,设定挡水建筑物在水槽1000 m处,建筑物浸入水中2.5 m。计算面积区域及网格如图2所示。恒定流情况下,上游边界由水位控制,取为0.2 m,下游为0 m;非恒定流情况下,上游边界取振幅为0.2 m,周期为12 h的半日潮波,下游边界为闭边界(图1)。

2.2 数值求解

连续方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0$$

(7)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + fv - \frac{\tau_{bx}}{\rho H} + N_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

(8)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} + fu - \frac{\tau_{by}}{\rho H} + N_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$

(9)

其中

$$\tau_{bx} = \frac{n^2 g \rho}{H^{\frac{1}{3}}} Wu \quad \tau_{by} = \frac{n^2 g \rho}{H^{\frac{1}{3}}} Wv \quad W = \sqrt{u^2 + v^2}$$

式中: h ——自由水面与基准面垂线距离; t ——时间; u 、 v —— x 、 y 方向垂向平均流速; f ——科氏力系数; ρ ——水的密度; N_x 、 N_y —— x 、 y 方向水流紊动黏性系数; τ_{bx} 、 τ_{by} —— x 、 y 方向底部剪切应力; W ——合成流速。

将式(4)和 τ_{bx} 、 τ_{by} 带入动量方程可等到等效糙率法下的动量控制方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + fv - \frac{gR^{\frac{4}{3}} \Delta h H^{\frac{2}{3}}}{LQ^2} Wu + N_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

(10)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} + fu - \frac{gR^{\frac{4}{3}} \Delta h H^{\frac{2}{3}}}{LQ^2} Wv + N_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$

(11)

3 讨论与分析

恒定流情况下,通过模型计算得到数值水槽的单宽流量为2.38 m²/s,利用明渠均匀流计算相同条件下的单宽流量为2.17 m²/s,结果存在一定偏差。分析原因如下:一方面是由于在明渠均匀流中其地形存在底坡,表层流与底层流平行,而在数值模型计算中地形为水平,上游水位高而下游水位低,因此其表层水流与底层水流非平行;另一方面在数值模型中边壁为光滑边界,没有考虑边壁的阻水效果,因而计算结果偏大。但是,由于明渠均匀流与数值水槽的差别较小,因此认为明渠均匀流公式可以应用于数值水槽中相关参数的计算。

为比较3种方法对挡水建筑物处理后的阻水效果,根据内边界法提供的上下游水位差分别计算不同 L 下各种方法的计算参数(表1),并通过分析恒定流和非恒定流情况下断面流速、水位等水动力参数来比较3种方法的优缺点。

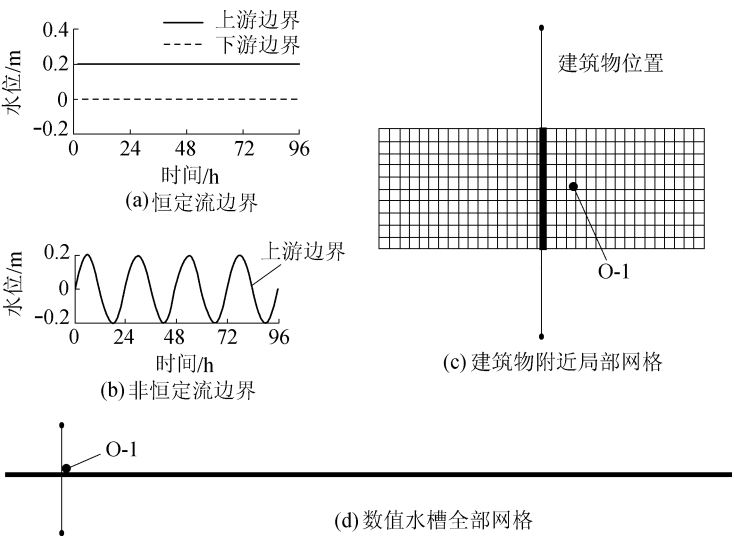


图1 计算网格及边界条件

Fig. 1 Computational grid and boundary conditions

3.1 恒定流

水槽纵断面中心线、建筑物两侧均取1 km 为代表断面,其纵断面线上水位及流速如图2所示。由图2可知,3种方法均能够模拟出建筑物对水位及流速的影响。顺水流方向,由于过水断面面积减小,流速降低,流量减少。内边界法通过为建筑物两侧提供真实过流量,能较好地反映建筑物前后的流速及水位变化。在同一虚拟长度内,由于地形法对局部地形修改较大,流速及水位均出现突变,其值远大于内边界法,而糙率法则更接近于内边界法。

表1 3种方法相关参数

Table 1 Parameters corresponding to three methods						
L/m	内边界法		糙率法		地形法	
	n	水深/ m	n	水深/ m	n	水深/ m
10	0.02	5	1.694	5	0.02	0.327
20	0.02	5	1.198	5	0.02	0.403
50	0.02	5	0.757	5	0.02	0.532
100	0.02	5	0.536	5	0.02	0.656
200	0.02	5	0.379	5	0.02	0.81
500	0.02	5	0.24	5	0.02	1.072

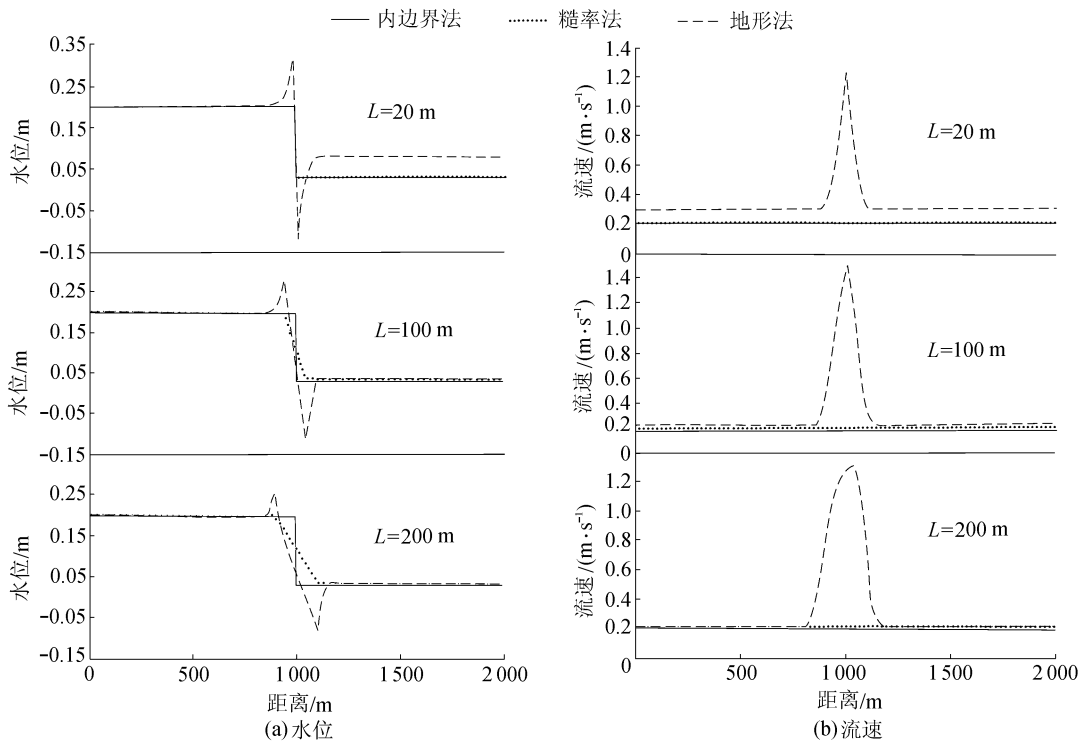


图2 不同L下水位及流速沿程变化(坐标原点为入流边界起点)

Fig. 2 Variations of water level and flow velocity with different virtual lengths along channel (origin of coordinate is starting point of inflow boundary)

对于糙率法,随着L的缩小,当量糙率随之增加,下游水位升高,流速渐缓,水位和流速越趋近于内边界法(图3),当L=20 m时其流量几乎与内边界结果一致(表2)。在地形法中,由图4可知,随L的减小,下游水位逐渐降低,流速增加,过流量增大,当L=200m时,其过流能力接近于内边界的过流能力;但是由于地形

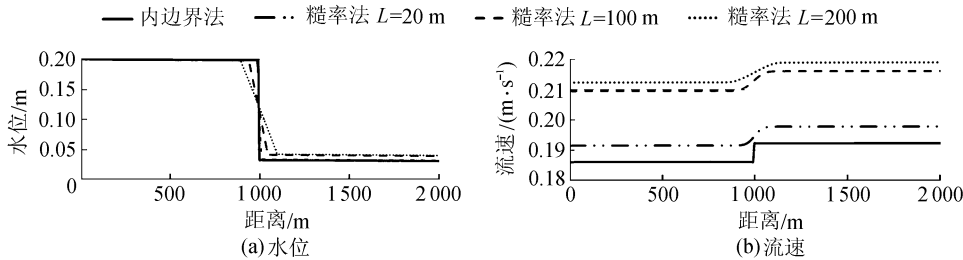


图3 糙率法在不同虚拟长度下水位及流速沿程变化(坐标原点为入流边界起点)

Fig. 3 Variations of water level and flow velocity with different virtual lengths along channel using equivalent discharge roughness correction method (origin of coordinate is starting point of inflow boundary)

改变较大,水位及流速在建筑物处突变,导致上下游均出现较大的流速,水位在建筑物前壅高,其后出现水跌的现象,其影响范围较大,不能很好地对建筑物附近的水动力特性进行模拟。

3.2 非恒定流

由不设置挡水建筑物的模型计算可得出建筑物两侧的实时变动水动力条件,在一定的时间范围内(本模拟采用 30 min),认为水流为恒定流,因此可以通过孔流公式计算在不同时刻

表 2 不同虚拟长度下 3 种方法计算的单宽流量
Table 2 Discharge per unit width calculated by three methods under conditions of different virtual lengths m^3/s

L/m	单宽流量			
	无挡水建筑	内边界法	糙率法	地形法
10	2.383	0.985	0.838	
20	2.383	0.985	0.996	1.567
50	2.383	0.985	1.041	1.254
100	2.383	0.985	1.09	1.164
200	2.383	0.985	1.104	1.131
500	2.383	0.985	0.83	0.851

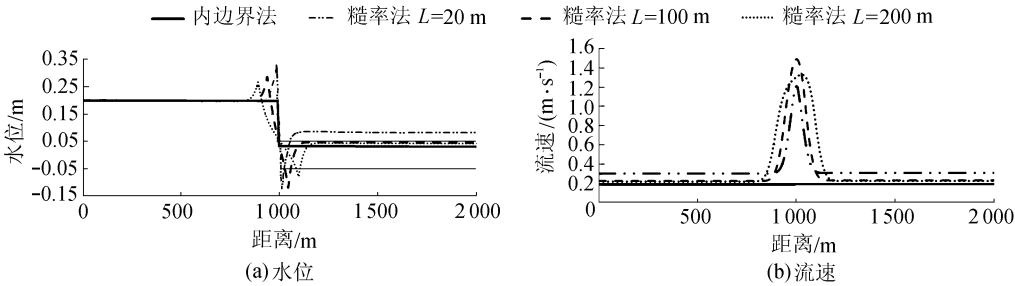


图 4 地形法在不同虚拟长度下水位及流速沿程变化(坐标原点为入流边界起点)

Fig. 4 Variations of water level and flow velocity with different virtual lengths along channel using equivalent discharge topographic correction method (origin of coordinate is starting point of inflow boundary)

通过建筑物的流量,作为内边界法的边界条件。受边界影响,建筑物两侧水位出现周期性波动,其两侧的水位差也处于变动状态,因此在利用糙率法和地形法时,当量糙率和水深也随时间变化(图 5)。在所建立的模型中,可将当量糙率的时间序列输入模型,由于地形的实时改变较难实现,因此取地形平均值作为非恒定流下地形法的修改地形值。

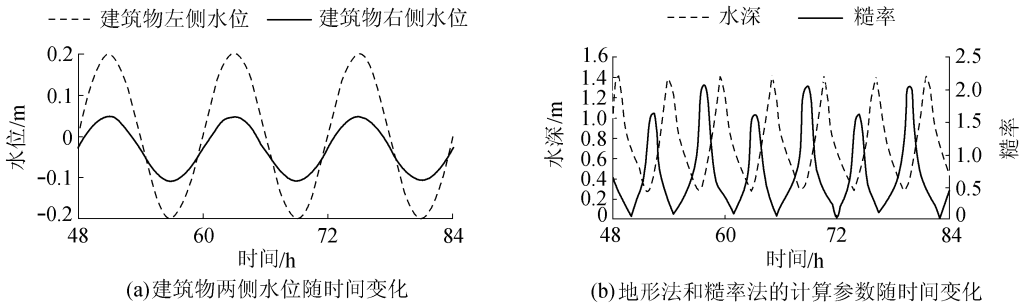


图 5 数值稳定后建筑物两侧水位、地形法和糙率法的计算参数随时间变化过程 ($L=100\text{ m}$)

Fig. 5 Time-varying water levels on both sides of water-blocking hydraulic structure and parameters of equivalent discharge topographic correction method and equivalent discharge roughness correction method after numerical simulation is stabilizes ($L=100\text{ m}$)

由于当量糙率能够实时地反映建筑物两侧水位的变化过程,故糙率法的流量过程能够与内边界法匹配良好(图 6);地形法中,地形的平均取值不能反映建筑物两侧水位的变化过程,其过流量与内边界法的差异明显,且地形突变较大,导致数值计算可能不稳定,因此改变地形法在非恒定流计算应用中存在一定缺陷。

通过对水位和流速的变化比较,发现 3 种方法均在一定程度上反映了过流阻水建筑物的阻水效应。但是由于所选取的公式及参数均利用以往的研究成果,针对上部阻水结构的研究尚少,具有一定的经验性,因此有必要进行深入研究,得到更为精确的处理方式。

4 结 语

利用内边界法、等效过流糙率修正法和等效过流地形修正法对挡水建筑物进行适当的概化,能够在一定程度上简化反映其对水流结构的影响;

a. 内边界法、糙率法和地形法均能反映过流阻水建筑物的阻水效应,即沿着水流方向,建筑物前水位壅高,其后水位降低,流速整体减小。

b. 内边界法将逐时的流量作为通过建筑物的边界,保证了在建筑物前后的流量守恒,较为精确地模拟出建筑物两侧的水流特征。

c. 糙率法将水流因建筑物阻碍导致的水头损失转化为底部应力对水头的损耗,物理概念清晰。在恒定流下,随着修改范围的减小,其模拟结果越接近于内边界法;在非恒定流下,模型引入能够反映水位变化的当量糙率,模拟结果与内边界法匹配良好。

d. 改变地形法由于对地形改变较大,在局部发生突变,难以真实反映建筑物附近对水流的影响,结果与内边界法相差较大,不能应用于非恒定流下的模拟。

e. 3种方法为计算区域有挡水建筑物的二维平面水动力数值模型提供了参考处理方法,同时内边界法对不同精细度模型的耦合具有重要的参考价值。

参考文献:

[1] 唐士芳,李蓓. 桩群阻力影响下潮流数值模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2001(5): 25-29. (TANG Shifang, LI Bei. Study on numerical simulation of tidal flow influenced by pile group resistance[J]. China Harbour Engineering, 2001(5): 25-29. (in Chinese))

[2] 唐士芳. 二维潮流数值水槽的桩群数值模拟[J]. 中国港湾建设, 2002(3):14-21. (TANG Shifang. Numerical simulation for pile group in numerical water flume of two dimensional tidal flow[J]. China Harbour Engineering, 2002(3):14-21. (in Chinese))

[3] 张细兵,余新明,金琨. 桥渡壅水对河道水位流场影响二维数值模拟[J]. 人民长江, 2003, 34(4): 23-47. (ZHANG Xibing, YU Xinming, JIN Kun. Numerical simulation of flow field in upstream backwater area of bridge and aqueduct[J]. Yangtze River, 2003, 34(4):23-47. (in Chinese))

[4] 曹民雄,甘小荣,周丰年,等. 潮汐河段桥墩对水流影响的数值计算与分析[J]. 人民长江, 2006,37(4): 81-84. (CAO Minxiong, GAN Xiaorong, ZHOU Fengnian, et al. Numerical modeling of the flow field under the impact of bridge piers in tidal river[J]. Yangtze River, 2006,37(4): 81-84. (in Chinese))

[5] 李光炽,周晶晏,张贵寿. 高桩码头对河道流场影响的数值模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(4):216-220. (LI Guangchi, ZHOU Jingyan, ZHANG Guishou. Numerical simulation of river flow patterns affected by standing pile wharf [J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2004,32(4):216-220. (in Chinese))

[6] 张玮,王斌,夏海峰. 近海风电场风机桩群布局对海域水动力条件的影响[J]. 中国港湾建设, 2007(2):1-4. (ZHANG Wei, WANG Bin, XIA Haifeng. Impact of layout of pile groups as foundation for offshore wind power generators upon hydrodynamic conditions[J]. China Harbour Engineering,2007(2):1-4. (in Chinese))

[7] 解鸣晓,张玮,谢慧姣. 桩群数值模拟中的概化方法研究[J]. 水动力学研究与进展,2008,23(4):464-471. (XIE Mingxiao, ZHANG Wei, XIE Huijiao. Simplification method in numerical modeling of bridge pier group [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2008,23(4):464-471. (in Chinese))

[8] 唐磊,张玮,解鸣晓,等. 等效阻力法在感潮河段桥墩群概化中的运用研究[J]. 水道港口,2010,31(5): 358-364. (TANG Lei, ZHANG Wei, XIE Mingxiao, et al. Research on application of equivalent resistance to simplify bridge piers group for tidal river section[J]. Journal of Waterway and Harbor 2010, 31(5): 358-364. (in Chinese))

[9] 王晨阳,李孟国,李文丹. 港珠澳大桥工程二维潮流数学模型研究[J]. 水道港口,2010,31(3): 187-194. (WANG Chenyang, LI Mengguo, LI Wendan. Research on two dimensional tidal flow mathematical model of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge engineering[J]. Journal of Waterway and Harbor,2010,31(3): 187-194. (in Chinese))

[10] 傅宗甫,赵春潮,安建峰. 异形孔桥墩附近河道水流流动特性[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):402-406. (FU Zongfu, ZHAO Chunchao, AN Jianfeng. Flow characteristics around bridge pier with special orifice[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2011,39(4): 402-406. (in Chinese))

[11] XIA Junqiang, FALCONER R A, LIN Binliang. Impact of different tidal renewable energy projects on the hydrodynamic processes in the Severn Estuary, UK[J]. Ocean Modelling. 2010,32 (1/2):86-104.

[12] XIA Junqiang, FALCONER R A, LIN Binliang. Impact of different operating modes for a Severn Barrage on the tidal power and flood inundation in the Severn Estuary, UK[J]. Applied Energy, 2010,87(7):2347-2391.

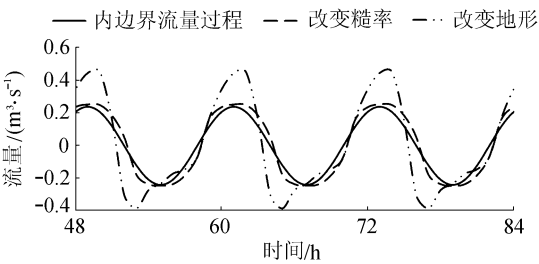


图6 数值稳定后建筑物附近 O-1 点的流量过程
Fig. 6 Discharge process of point O-1 located beside water-blocking hydraulic structure after numerical simulation stabilizes