

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.01.011

响水涧抽水蓄能电站引、尾水道上弯段弯道效应分析

张兰丁

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要 分析研究响水涧抽水蓄能电站引水道、尾水道上弯段水力特性,明确其弯道效应主要表现形式为:门井边垂线流速大于或接近中垂线流速;中垂线流速分布呈轻微扭曲状;沿弯道(段)横断面圆周测压管水头不等于常数。试验表明:上弯段与门井间距离在 5 倍管径左右可以基本消除弯道效应对流速分布的影响,在 7 倍管径左右可以基本消除弯道效应对压力分布的影响。

关键词 输水管道;弯道效应;流速分布;测压管水头;水工模型试验;响水涧抽水蓄能电站
中图分类号 :TV742 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2011)01-0045-05

Bend effect of upper bend sections of headrace and tailrace conduits of Xiangshuijian Pumped Storage Power Station//
ZHANG Lan-ding(State Key Lab of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China)

Abstract :Hydraulic characteristics of the upper bend sections of headrace and tailrace conduits of Xiangshuijian Pumped Storage Power Station were studied. The bend effect was revealed :(1) the mean flow velocities of vertical lines at both sides of gate shafts were nearly equal to or larger than those of vertical line in the center of gate shafts ;(2) the velocity distribution of vertical lines in the center was slightly distorted ;(3) the piezometric head was not a constant along the circumference of cross section at the bend sections. The model test results indicate that the influences of the bend effect on the velocity distribution can be avoided when the distance between the bend section and the gate shaft is about five times the conduit diameter , and those of the bend effect on the pressure distribution can be avoided when the distance is about seven times the diameter.

Key words :conduit ; bend effect ; velocity distribution ; piezometric head ; hydraulic model test ; Xiangshuijian Pumped Storage Station

对于弯道水流,以研究有自由面的平面弯道水流居多,特别是针对蜿蜒河流。有自由面的平面弯道水流的水力参数在水工或河工模型试验中便于量测,如流速分布、水面线、时均压力等。但针对有压输水管道的弯道水流研究(平面或立面)较少见,其中主要原因之一是有压管道水流的水力参数不便于量测,如流速分布测量等。虽然激光测速仪可用于有压输水管道试验,但限于使用条件等多种因素,很难用于常规水工模型试验。

通常认为有压输水管道的弯道与明渠弯道类似,存在螺旋流动^[1]。柴恭纯等^[2]采用人为的方法使有压管道(平面)中产生螺旋流动使水流消能,研究表明,在管道产生螺旋流动的起始断面,沿管道圆周壁面两点时均压力差值高达 98 kPa(10 m 水柱)。由于对有压输水管道的弯道水流流动机理缺乏系统的研究,因此对于其弯道效应的认识还很不充分。常规水电工程设计一般参照国外工程设计经验^[3],这样抽水蓄

能电站上、下库进/出水口(或者门井段)与上库引水道或下库尾水道上弯段之间的过渡段需要有很长距离的有压输水道,这在某些工程条件难以满足的情况下会给工程设计造成困难。本项研究以响水涧抽水蓄能电站上、下库进/出水口为依托工程,对上库引水道和下库尾水道上弯段水力特性进行研究。其中对于上库上弯段,在抽水工况(出流),水流由引水道流经上弯段流向进/出水口,需要考虑弯道效应;在发电工况(进流),水流由进/出水口流经上弯段流向引水道,没有弯道效应。下库尾水道上弯段发电工况(出流)需要考虑弯道效应。研究表明,在抽水蓄能电站有压输水管道中流速不太大的情况下,消除或克服弯道效应的不利影响并不难做到。

1 弯道效应对流速分布的影响

对于有自由面的平面弯道水流,人们普遍认为弯道离心力使得沿横断面存在横向环流,而对于有

压管道则认为由于弯道离心力的作用,存在沿流向推进的螺旋流动^[1]。针对工程的试验研究主要关注主流流速。由于螺旋流的流速和方向沿程急剧变化,流速分布难以测量,文献[2]采用了放射性同位素示踪法对螺旋流的推进速度进行了估计。但由于目前对有压管道测量流速分布尚有困难,其又存在区别于顺直管道水流的特殊现象,因此需要在工程设计中加以注意。

响水涧抽水蓄能电站引水道和尾水道上弯段位于铅直平面内,在上弯段与门井段之间以圆变方段过渡连接,见图1和图2。笔者自20世纪90年代起对顺直管道的门井段流速分布进行了系统的测量,根据同一工程几何比尺为1:30和1:45的模型试验结果,圆变方段不会改变顺直管道的流速分布形态^[4,5]。本项研究下库进/出水口模型比尺为1:40,上库进/出水口模型比尺为1:50。试验研究表明,该工程水道上弯段弯道水流有如下特点:①将水流推向边壁,加大了近壁流速;②管道中心流速分布呈

轻微扭曲状,有别于顺直管道的流速分布形式^[6,8]。

1.1 下库尾水道上弯段流速分布试验

响水涧抽水蓄能电站有4条尾水道与下库进/出水口相连接,尾水斜井上弯段终点与门井前圆变方段之间过渡段的水平距离为11.518 m($L/D = 1.69$, D 为上弯段管径),见图1。

由于不具备实测上弯段内部流速分布的条件,在尾水事故闸门井段进行了时均流速测量。表1、图3仅给出了部分测量结果。

表1 下库进/出水口工程采用方案4台机组发电
工况门井段平均流速分布试验结果

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下库 水位/m	垂线号	平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
			1号 门井	2号 门井	3号 门井	4号 门井
611.85	2.99	1	3.55	3.73	3.38	3.48
611.85	2.99	2	3.34	3.52	3.29	3.40
611.85	2.99	3	3.28	3.19	3.36	3.29

注 2号垂线为中垂线,其余为边垂线。1~4号门井段流速分布不均匀系数分别为1.14,1.16,1.14和1.09。流速分布不均匀系数 = $\bar{v}/v_{\text{max}}$,其中 $\bar{v}$ 为孔口平均流速(分别对垂线1,2,3流速取平均), v_{max} 为孔口最大点流速。

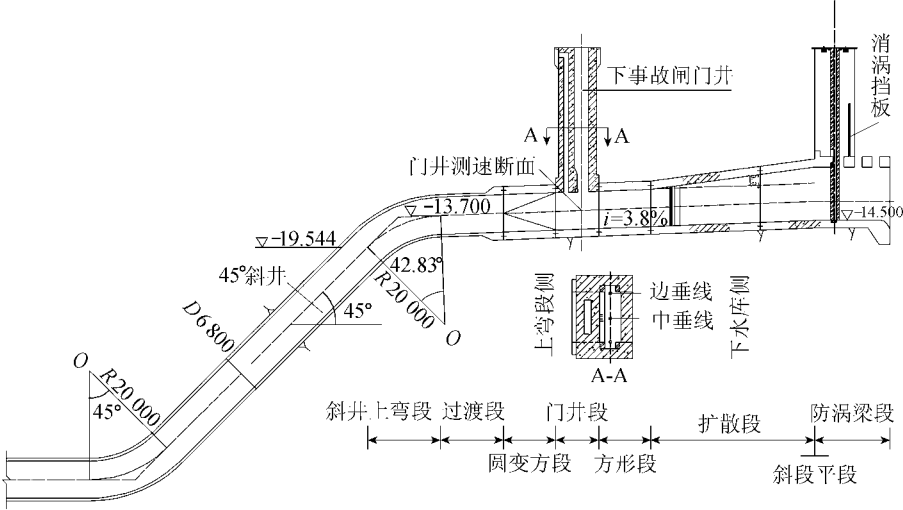


图1 下库进/出水口工程采用方案水工模型结构布置示意图

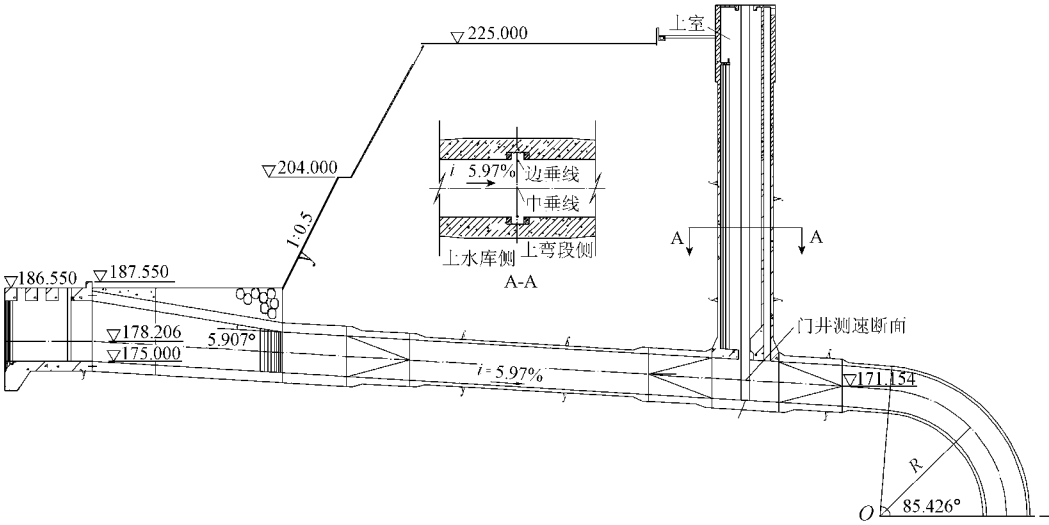


图2 上库进/出水口工程采用方案水工模型结构布置示意图

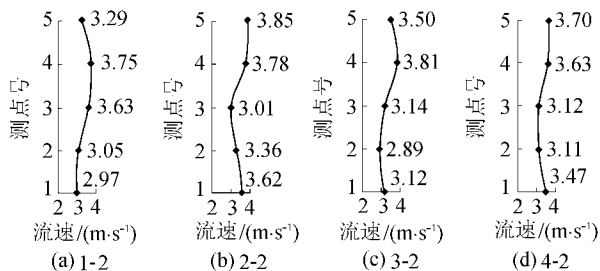


图3 下库进/出水口工程采用方案4台机组发电工况门井段中垂线流速分布

图3中时均流速采用南京水利科学研究院研制的旋桨流速仪测量,配有计算机采集程序,多点同步测量即同步测量4个门井段相应位置的点流速。边垂线施测时桨叶尽量靠近模型边壁,距离边壁大约2.0 mm。因此边垂线流速即为近壁流速。

由表1可知,4个门井段均有边垂线平均流速(一侧或两侧)明显大于中垂线平均流速的现象,这与顺直管道流速分布特性不同,一般情况下应该是管道中部流速大于近壁流速(边垂线流速)。由图3可见,4个门井段的中垂线(图中1-2~4-2分别表示1~4号门井段的2号垂线)流速分布形态均呈轻微扭曲状,也与顺直管道不同。一般的管道中部流速分布应为指数、对数或抛物线分布,为光滑曲线,并不呈扭曲状态。因此,这2种现象应该归结为尾水斜井上弯段的弯道效应。由于下库尾水道上弯段与门井段过渡段之间距离很短($L/D = 1.69$),尽管中间还有圆变方段,但由于水流的惯性作用,弯道效应依旧难以消除。为了适应上弯段的流动特性,笔者改变了目前国内外广泛采用的进/出水口扩散段(三墩四流道)分流墩头部不等间距布置惯例,采用等间距布置,获得了良好的分流效果,使下库进/出水口达到较小的损失系数。

1.2 上库引水道上弯段流速分布试验

为了进一步验证上弯段的2个水力特性,在上库进/出水口的水工模型试验中,进一步对衔接上库进/出水口的4个引水道上弯段(图2)进行了对比研究。部分研究成果见表2和图4。

表2 下库进/出水口工程采用方案4台泵抽水工况门井段平均流速分布试验结果

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下库 水位/m	垂线号	平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
			1号 门井	2号 门井	3号 门井	4号 门井
555.93	190.1	1	3.69	3.73	3.55	3.58
555.93	190.1	2	3.20	3.45	3.41	3.27
555.93	190.1	3	3.43	3.77	3.48	3.38

注:1~4号门井段流速分布不均匀系数分别为1.16,1.10,1.11和1.11。

响水涧上库引水道上平段与竖井之间以近90°上弯段相连接,4条引水道的上弯段与门井间采用

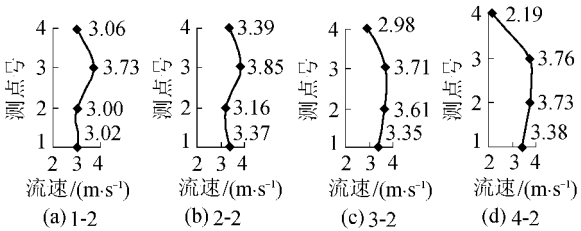


图4 上库进/出水口工程采用方案4台泵抽水工况门井段中垂线流速分布

不等长度布置,其中1~4号上弯段终点与门井圆变方段之间过渡的水平距离分别为1.395 m,15.395 m,29.395 m和43.395 m。由表2、图4可知,1号、2号门井段边垂线流速明显大于中垂线流速且中垂线流速分布呈轻微扭曲状,3号、4号门井段也有边垂线流速大于中垂线流速的现象,不过差值要小很多,但是最重要的是3号、4号门井段中垂线流速分布形态基本属常态,无扭曲现象。

改变流动方向进行了无弯道影响门井段流速分布测量,结果见表3和图5。从表3和图5可见,进/出水口发电工况4个门井段流速分布形态一致,无扭曲现象,与抽水工况有弯道影响的1号、2号门井段流速分布形态存在明显区别。

表3 上库进/出水口工程采用方案4台机组发电工况门井段平均流速分布试验结果

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下库 水位/m	垂线号	平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
			1号 门井	2号 门井	3号 门井	4号 门井
572.48	190.2	1	3.40	3.56	3.6	3.61
572.48	190.2	2	3.55	3.61	3.68	3.75
572.48	190.2	3	3.22	3.14	3.19	3.06

注:1~4号门井段流速分布不均匀系数分别为1.18,1.19,1.18和1.18。

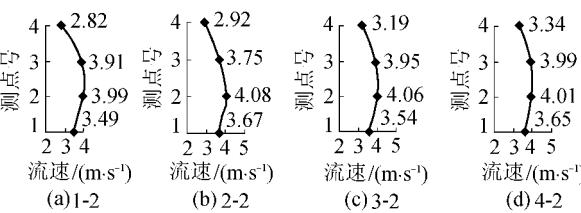


图5 上库进/出水口工程采用方案4台机组发电工况门井段中垂线流速分布

试验结果表明,改变流动方向,水流在进入门井段时同样要经过一个圆变方段,流速分布测量结果表明,门井段流速分布为平顺曲线,证明圆变方段对流速分布形态影响不大。因此,虽然在上弯段与门井段之间还存在一个9.0~10.0 m的圆变方段,但由于水流的惯性作用,由门井段测出的流速分布特性仍然可以说明上弯段弯道效应的影响。由此可以认为,上弯段中心流速分布不再服从顺直管道流速分布形式(抛物线、对数或指数形式)。根据引水道上

弯段试验结果,初步认为,在上弯段与门井圆变方段之间距离 $L/D \geq 4.6$ 时,可以基本消除弯道效应对流速分布的影响。

2 弯道效应对压力分布的影响

为了了解弯道效应对压力分布的影响,测量了上库 4 号引水道上弯段沿圆周测压管水头分布,上弯段管壁测压管水头测点布置见图 6。

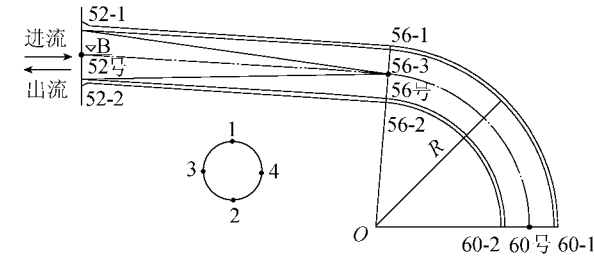


图 6 4 号上弯段测压管水头测点布置

2.1 离心力对有压弯道测压管水头分布的影响

对于顺直管道,在均匀流条件下管道横断面上 4 个测点测压管水头(图 6)约等于常数,由于测量误差,允许存在微小差异。对于有压弯道如上弯段,由于存在离心力的作用,测压管水头必然有别于顺直管道。假定水流质点在上弯段做匀速圆周运动,其向心加速度 $a_u = \frac{v^2}{R}$,其中 $v = \bar{v}$, $R = 20\text{ m}$,其内壁与外壁半径分别为 $R - \frac{D}{2}$ 及 $R + \frac{D}{2}$ ($D = 6.4\text{ m}$)。因此其内外壁向心加速度近似为

$$a_{u内} = a_{u2} = \frac{\bar{v}^2}{R - \frac{D}{2}} = a_u(1 + 0.191) \quad (1)$$

$$a_{u外} = a_{u1} = \frac{\bar{v}^2}{R + \frac{D}{2}} = a_u(1 - 0.137) \quad (2)$$

上述结果之所以为近似是由于其内外壁线速度 $v \neq \bar{v}$,此处为简便起见假设 $v = \bar{v}$ 。式(1)式(2)向心加速度差值大约为 33%,并且在内外壁由于弯道效应产生的压力对管壁的作用方向不同,因此使沿圆周测压管水头不再近似等于常数,产生了压力差 ΔH 。

2.2 上库 4 号引水道上弯段测压管水头分布试验

抽水蓄能电站压力管道具有双向流动的特点,试验测量了 4 号引水道上弯段 2 个方向的测压管水头分布。表 4~5 给出了部分水位、流量级别的沿上弯段圆周测压管水头值及相邻 2 点的压力差值。

试验表明,测点 56 和测点 60 测压管水头在进、出流工况下 H_1 最大, H_2 最小,与作用于水流的离心力分布规律一致,见表 4~5。测点 1 处的离心力与测压管水头作用方向相同,测点 2 处的离心力与测压管水头作用方向相反,因此 $H_1 > H_2$ 。表 4~5 还表明,由于存在离心力,测点 56 和测点 60 相邻点压力差比测点 52 要大,使流动不对称,多有 $H_3 \neq H_4$,以上可以归结为上弯段弯道效应对压力分布的影响。测点 52 在抽水工况下 $H_1 \sim H_4$ 数值基本相等或差异很小(表 4)相邻点压力差为零或差异很小,符合顺直管道压力分布的特性,说明在测点 52 处已基本没有弯道效应的影响。

如上所述,测点 52 沿圆周 $H_1 \sim H_4$ 在各级水位(试验测量了多级水位)流量下测压管水头约等于常数,符合顺直管道流动特性,测点 52 与测点 56 之间为过渡段,长度为 43.395m,即 $L = 6.78D$ 可以基

表 4 4 号引水道上弯段 4 台泵抽水工况测压管水头及相邻点压力差值

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水位/ m	测点 号	H_1 / m	H_2 / m	H_3 / m	H_4 / m	ΔH_{1-2} / m	ΔH_{3-4} / m	ΔH_{3-2} / m	ΔH_{4-2} / m	ΔH_{1-3} / m	ΔH_{1-4} / m
530.48(133.00)	199.0	52	27.58	27.58	27.63	27.63	0	0	0.05	0.05	-0.05	-0.05
530.48	199.0	56	27.98	27.63	27.68	27.83	0.35	-0.15	0.05	0.20	0.30	0.15
530.48	199.0	60	27.93	27.68	27.83	27.78	0.25	0.05	0.15	0.10	0.10	0.15
452.52(112.16)	222.5	52	51.23	51.23	51.23	51.23	0	0	0	0	0	0
452.52	222.5	56	51.48	51.23	51.28	51.33	0.25	-0.05	0.05	0.10	0.20	0.15
452.52	222.5	60	51.43	51.23	51.38	51.28	0.20	0.10	0.15	0.05	0.05	0.15

注:表中给出的是 4 条引水道总流量,其中 4 号引水道流量在括号中给出,下同,基准为上弯点高程 B(171.042 m),下同。

表 5 4 号引水道上弯段 4 台机组发电工况测压管水头及相邻点压力差值

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水位/ m	测点 号	H_1 / m	H_2 / m	H_3 / m	H_4 / m	ΔH_{1-2} / m	ΔH_{3-4} / m	ΔH_{3-2} / m	ΔH_{4-2} / m	ΔH_{1-3} / m	ΔH_{1-4} / m
589.00(147.34)	198.1	52	25.53	25.68	25.63	25.63	-0.15	0	-0.05	-0.05	-0.10	-0.10
589.00	198.1	56	25.43	25.13	25.28	25.18	0.30	0.10	0.15	0.05	0.15	0.25
589.00	198.1	60	25.58	25.13	25.28	25.33	0.45	-0.05	0.15	0.20	0.30	0.25
599.38(151.05)	203.5	52	30.98	30.88	30.88	30.88	0.10	0	0	0	0.10	0.10
599.38	203.5	56	30.93	30.73	30.73	30.63	0.20	0.10	0	-0.10	0.20	0.30
599.38	203.5	60	30.88	30.73	30.73	30.73	0.15	0	0	0	0.15	0.15

本消除上弯段弯道效应对压力分布的影响。

3 结 语

通过测量与引水道、尾水道上弯段毗邻的门井段流速分布,揭示了上弯段弯道效应对流速分布的影响,通过测量沿引水道上弯段圆周测压管水头,揭示了上弯段弯道效应对压力分布的影响,对位于铅直平面内的上弯段弯道效应有如下结论:①将水流推向边壁,加大了近壁流速;②管道中心流速分布呈扭曲状,有别于顺直管道流速分布形态;③过渡段长度 $L=5.0D$ 时,流速分布形态可以符合顺直管道流动特性,流速分布基本无弯道效应影响;④过渡段长度 $L=7.0D$ 时,时均压力分布符合顺直管道流动特性,压力分布基本无弯道效应影响。

通过对响水涧抽水蓄能电站引、尾水道上弯段水力特性进行研究,明确了避免弯道效应的过渡段长度,给工程设计带来了便利,研究成果已用于响水涧工程设计。本文的研究基于原型压力管道内平均流速 $4\sim5\text{ m/s}$ 左右,当弯道内流速增加后上述结论是否成立有待后续研究做出判断。

致谢:上海勘测设计研究院响水涧抽水蓄能电站项目部总工程师肖贡元教授级高工对本项研究提出了许多建议,在此表示诚挚的谢意。

(上接第 10 页)

4 结 语

水流中悬浮物的运动状态既可能是沉降也可能是上扬,衰减模型难以真实地反映 SS 质量浓度的沿程变化,因此采用衰减模型预测疏浚施工时 SS 对环境的影响并不合理。笔者提出采用泥沙模型预测疏浚施工时 SS 对水环境的影响,通过附加“汇”的方法模拟防泥幕帘的拦泥效果,可反映泥沙运动的真实情形,物理意义更加明确。将该模型运用于治理深圳河第 4 期工程的环境影响评价中,效果较好。

参考文献:

[1] 贾怡然,孙英兰,张学庆.港池疏浚过程悬浮物影响预测研究及应用[J].港工技术,2007(3):3-5.
[2] 邹家祥.环境影响评价技术手册[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
[3] 张瑞瑾.河流泥沙运动力学[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1998.

参考文献:

[1] 清华大学水力学教研组.水力学(上册)[M].北京:人民教育出版社,1979.
[2] 柴恭纯,马萍章.单项涡旋内消能工的试验研究(二)[R].南京:南京水利科学研究院,1993.
[3] 谭颖.抽水蓄能电站取水口水力学的基本问题[R].北京:水利水电勘测设计院,水利电力部北京勘测设计院,1988.
[4] 张兰丁.抽水蓄能电站侧式进/出水口水力学问题研究[R].南京:南京水利科学研究院,2003.
[5] 张兰丁.琅琊山抽水蓄能电站上、下库进/出水口模型试验研究总报告[R].南京:南京水利科学研究院,1995.
[6] 张兰丁.响水涧抽水蓄能电站下库进/出水口水工模型试验研究(上册)[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
[7] 张兰丁.响水涧抽水蓄能电站下库进/出水口水工模型试验研究(下册)[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
[8] 张兰丁.响水涧抽水蓄能电站上库进/出水口体型验证试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2009.

(收稿日期 2010-01-05 编辑:方宇彤)

[4] 辛小康,刘刚,张向东,等.基于遗传优化的河网数学模型糙率参数反演[J].水利水电科技进展,2009,29(6):21-24.
[5] MU Jing-bin,ZHANG Xiao-feng. Real time flood forecasting method with 1-D unsteady flow model[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B,2007,19(2):150-154.
[6] ZHANG Ming-liang,SHEN Yong-ming. Study and application of steady flow and unsteady flow mathematical model for channel network[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B,2007,19(5):572-578.
[7] 张丽春,方红卫,府仁寿.一维非恒定均匀泥沙数学模型研究[J].泥沙研究,1998(3):81-85.
[8] 张蔚.河网与河口地区耦合模型研究及应用[D].南京:河海大学,2006.
[9] 诸裕良,严以新,贾良文,等.一维河网非恒定流及悬沙数学模型的节点控制法[J].水动力研究与进展:A辑,2001,16(4):503-510.
[10] 长江水资源保护科学研究所.治理深圳河第四期工程环境影响评估报告[R].武汉:长江水资源保护科学研究所,2000.

(收稿日期 2010-07-14 编辑:高建群)