

响水涧抽水蓄能电站上、下库进(出)水口分流特性研究

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 根据响水涧抽水蓄能电站上、下库进(出)水口水工模型试验结果,对上、下库侧式进(出)水口分流特性进行分析计算。引入“单位流速”的概念,用以调整进(出)水口扩散段分流墩头部间距,对下库进(出)水口采用分流墩头部不等间距布置和等间距布置进行对比试验研究,结果表明等间距布置分流效果较不等间距布置分流效果有明显改善,结合工程布置,采用单位流速法,可对侧式进(出)水口的分流间距进行快速调整,以获得水力损失小、流态良好的进(出)水口体型布置。

关键词 单位流速;进(出)水口;分流间距;水工模型试验;响水涧抽水蓄能电站

中图分类号:TV743;TV651.1+2 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2010)06-0048-05

Flow-dividing characteristics of intakes/outlets in upper and lower reservoirs of Xiangshuijian Pumped Storage Station//
ZHANG Lan-ding, *State Key Lab of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*

Abstract: Based on the hydraulic model tests, the flow-dividing characteristics of intakes/outlets in upper and lower reservoirs of Xiangshuijian Pumped Storage Station were analyzed. The unit velocity method was introduced to adjust the spacing between the splitter walls at the entrance of diffuser section in side-type intakes/outlets. Comparative tests on unequal and equal spacings between the splitter walls of intakes/outlets in the lower reservoir were performed. The test results show that the arrangement of equal spacing is an improvement of that of the conventional unequal spacing. By adopting the unit velocity method in the project layout, the splitter wall spacing of side-type intakes/outlets can be quickly adjusted so as to achieve a better configuration with small hydraulic loss and satisfactory flow regime.

Key words: unit velocity; intake/outlet; splitter wall spacing; hydraulic model test; Xiangshuijian Pumped Storage Station

我国抽水蓄能电站采用侧式进(出)水口的很多,如十三陵、天荒坪、宜兴、琅琊山、泰安抽水蓄能电站……,它们的体型布置大多参考文献[1]所提供的形式。笔者在前国家电力公司资助下,以琅琊山抽水蓄能电站为依托,对侧式进(出)水口(二墩三流道和三墩四流道)水力学问题进行了较为系统的研究。研究表明^[2],影响进(出)水口水力特性的因素较多,是一个综合性问题。目前在工程设计中普遍采用的进(出)水口体型只是一个基本布置框架,是在实验室条件下得出的。工程实践中往往由于工程布置的需要,不能满足进(出)水口在实验室条件下的水流条件,主要包括与进(出)水口相连接的上下游边界条件:引水管路的长度、断面形状等,有时由于工程布置的需要,还会在与进(出)水口相毗邻的部位增加一些水工建筑物,如事故(检修)门井、拦污栅排架等。众多因素都会对进(出)水口水力特性造成不良影响,甚至产生不利于工程安全运

行的流态,进(出)水口分流不均在众多影响因素之一。当进(出)水口分流不均时就需要调整侧式进(出)水口分流墩的分流间距。调整分流间距可以使各流道流量更趋均匀,并进一步减小水力损失。具体的做法一般是要打开扩散段顶板,拆下分流墩,重新安装以调整分流间距,然后再进行孔口流速分布测量,计算孔口流量,并与量测流量进行对比。当扩散段起始断面来流不完全对称或存在流动稳定性干扰时,如下库事故(检修)闸门井毗邻进(出)水口,且与上弯段相距较近,弯道效应不可避免,往往需要进行多次调整,这样不仅耗时长,而且模型反复拆装也容易损坏,并且对于十分微小的分流间距调整时存在人为误差。因此,如何在这错综复杂的实施过程中找出一种物理概念清晰、定量准确的方法,一次性定出进(出)水口在上下游特定边界条件下最佳的分流间距是本文的研究目的。

本文所述及的分流特性研究主要针对进(出)水

口出流工况。侧式进(出)水口出流时,水流在平面及立面均处于扩散状态,极易发生分离及分流不均等不利流态,此时局部水力损失最大,因此是表征侧式进(出)水口分流特性的控制工况。

1 分流墩头部分流间距布置

侧式进(出)水口是一种将水流由小断面的压力隧洞过渡到开阔水域、库区、明渠,或者将开阔水域、库区、明渠大断面水体过渡到小断面压力隧洞的过渡性水工建筑物,它集中了引水道的局部水力损失。

侧式进(出)水口本身具有水力损失小、流态适应性强的优点。但是,如果不能妥善解决好与其相连接部位各个水工建筑物的体型布置以及外部边界条件,就不能发挥和利用侧式进(出)水口的优点,有时甚至会对工程产生不利流态。

目前国内外侧式进(出)水口普遍采用分流墩头部不等间距布置。二墩三流道分流墩头部间距分别为 $0.35B$ $0.3B$ $0.35B$ (B 为分流段总宽度,位于扩散段起始断面);三墩四流道式分别为 $0.28B$ $0.22B$ $0.22B$ $0.28B$ 。实践表明,由于在具体工程中进(出)水口上下游有不同的衔接方式,如果分流墩头部千篇一律地采用同样的布置方式就不能获得优良的水力特性。

响水涧抽水蓄能水电站上库事故门井(兼调压井)远离进(出)水口,防涡梁上方无拦污栅排架,为开敞式进(出)水口,见图1。下库事故门井毗邻进(出)水口,且与上弯段相距较近,防涡梁上方设有拦污栅排架,见图2。上、下库进(出)水口同为三墩四流式,扩散段体型基本相同,但试验表明,如果分流墩头部采用相同的不等间距布置就不能获得良好的

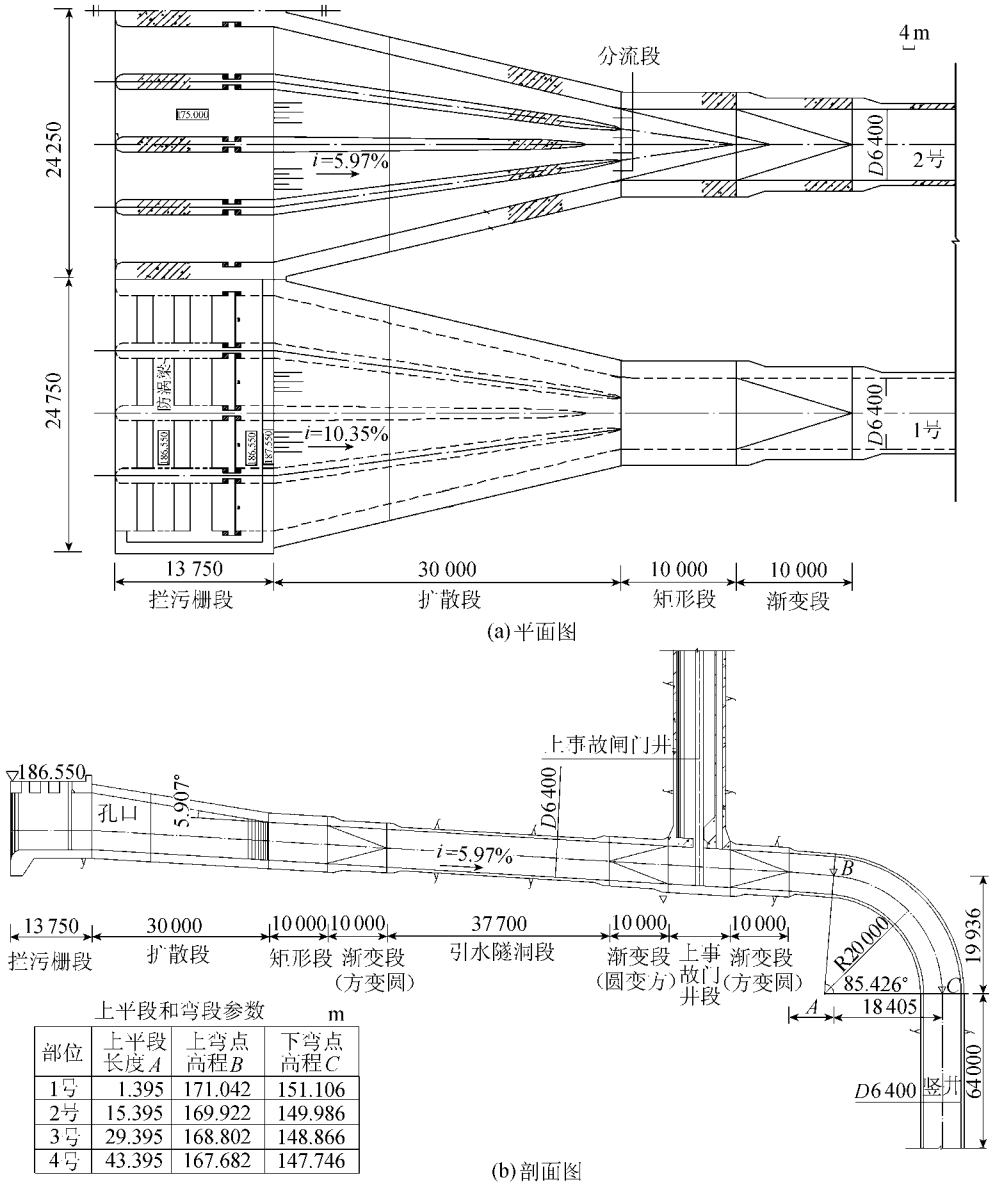


图1 上库进(出)水口结构布置示意图
(高程、桩号单位 m , 尺寸单位 mm)

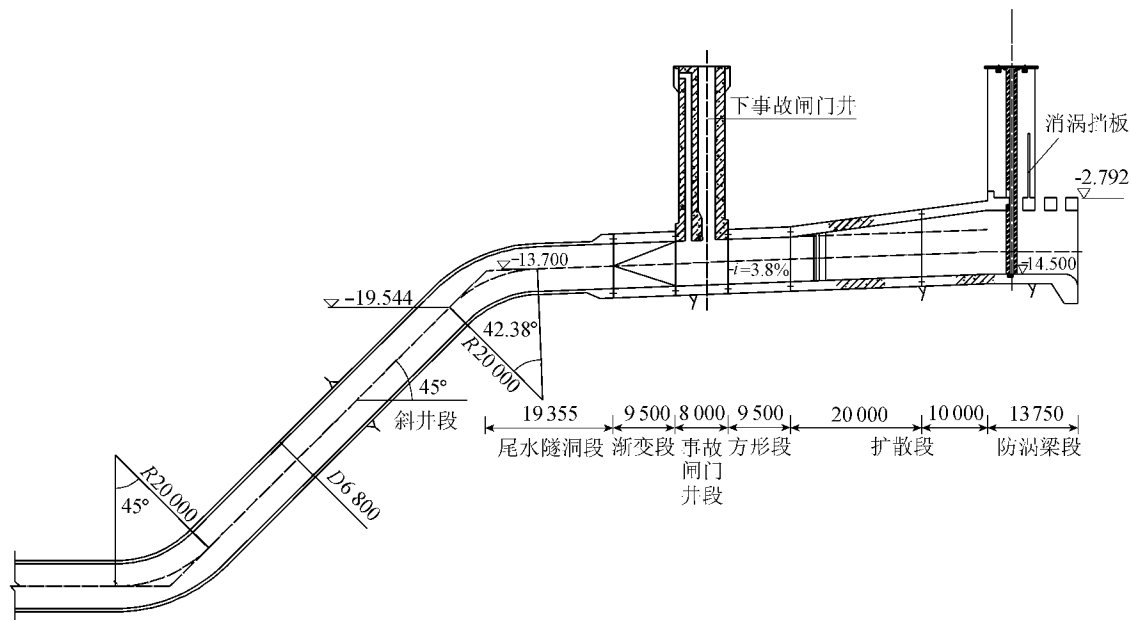


图2 下库进(出)水口结构布置纵剖面示意图
(高程、桩号单位 m,尺寸单位 mm)

分流特性,进而增加水力损失。

2 上、下库进(出)水口分流特性试验研究

上、下库进(出)水口分流特性研究主要是在出流条件下进行,上库进(出)水口运行工况是4台泵抽水,下库进(出)水口运行工况是4台机组发电。这是因为出流条件下水流处于扩散状态,水力损失最大,是评价进(出)水口分流特性的控制工况。

上库进(出)水口布置如图1所示,事故门井(兼调压井)远离进(出)水口,与竖井毗邻的4个上弯段以不等距离与事故门井相连接,与此有关的水力学问题研究见文献[3],本文重点讨论上、下库进(出)水口的分流特性。

模型试验表明,上库进(出)水口各级水位、流量在抽水工况下均具有良好的分流特性,相邻流道过流量差异小于10%,且流速分布均匀,流动稳定,水力损失小。出流条件下平均损失系数 $\eta_{\text{出}}=0.27$,这在国内已建工程中是较小的。表1、表2给出了1个流量级别的部分试验结果(共4个进(出)水口,限于篇幅,本文仅列举2个进(出)水口的试验结果),表中不均匀系数为孔口最大点流速与孔口平均流速之比,下同。1号进(出)水口分流不均匀性(相邻流道孔口平均流速最大差值)为0.09 m/s,2号进(出)水口分流不均匀性为0.05 m/s。

下库进(出)水口扩散段体型与上库类似,也是三墩四流道,平面布置可参照上库(图1),按照惯例也采用分流墩头部不等间距布置。表3给出了下库进(出)水口在分流墩头部平齐布置条件下的试验结

表1 上库1号进(出)水口流速分布
(流量 555.93 m³/s,水位 190.10 m)

流道	垂线号	分流 间距/ m	垂线平均 流速/ (m·s ⁻¹)	孔口平均 流速/ (m·s ⁻¹)	不均匀 系数
1	1	1.80	0.65	0.84	1.64
1	2	1.80	1.02	0.84	1.64
1	3	1.80	0.86	0.84	1.64
2	1	1.40	0.74	0.84	2.21
2	2	1.40	1.06	0.84	2.21
2	3	1.40	0.73	0.84	2.21
3	1	1.40	0.92	0.84	1.82
3	2	1.40	0.95	0.84	1.82
3	3	1.40	0.64	0.84	1.82
4	1	1.80	0.81	0.75	1.66
4	2	1.80	0.94	0.75	1.66
4	3	1.80	0.50	0.75	1.66

表2 上库2号进(出)水口流速分布
(流量 555.93 m³/s,水位 190.10 m)

流道	垂线号	分流 间距/ m	垂线平均 流速/ (m·s ⁻¹)	孔口平均 流速/ (m·s ⁻¹)	不均匀 系数
5	1	1.80	0.58	0.81	1.65
5	2	1.80	0.94	0.81	1.65
5	3	1.80	0.90	0.81	1.65
6	1	1.40	0.70	0.86	2.32
6	2	1.40	1.06	0.86	2.32
6	3	1.40	0.81	0.86	2.32
7	1	1.40	1.00	0.88	2.08
7	2	1.40	1.00	0.88	2.08
7	3	1.40	0.65	0.88	2.08
8	1	1.80	1.09	0.87	1.96
8	2	1.80	0.98	0.87	1.96
8	3	1.80	0.53	0.87	1.96

果^[4] ,其中 1 号、3 号进(出)水口扩散段起始断面宽度不同。

由表 3 可见 ,最大的流速分布不均匀系数为 2.73 ,小于 3.0 ,但表征分流不均匀性的相邻流道平均流速最大差值远大于流道平均流速的 10% ,因此认为下库进(出)水口分流特性仍有待改进。由此可见 ,对下库进(出)水口采用不等间距分流产生了分流不均的现象。

表 3 下库分流墩头部不等间距布置进(出)水口流速分布
(流量 639.26 m³/s ,水位 2.95 m)

进(出) 水口	分流 间距/ m	孔口平均 流速/ (m·s ⁻¹)	分流段 平均流速/ (m·s ⁻¹)	单位 流速/ (m·s ⁻¹)	不均 系数	分流不 均匀性/ (m·s ⁻¹)
1 号	1.80	1.01	3.44	1.91	1.61	0.31
	1.40	0.72	3.16	2.26	2.73	0.31
	1.40	0.78	3.42	2.44	2.54	0.31
	1.80	1.09	3.72	2.07	1.70	0.31
3 号	1.74	1.11	3.92	2.25	2.10	0.46
	1.36	0.65	2.93	2.16	2.25	0.46
	1.36	0.73	3.30	2.42	1.74	0.46
	1.74	0.92	3.25	1.87	1.73	0.46

3 下库进(出)水口分流特性分析计算

试验结果表明 ,上、下库进(出)水口体型基本相同 ,按照惯例分流墩头部间距采用相同的布置方式 ,上库进(出)水口取得了良好的分流效果 ,下库进(出)水口却分流不均。究其原因 ,是下库进(出)水口毗邻事故门井 ,而事故门井又毗邻尾水隧洞上弯段 ,弯道效应的影响不可避免 ,造成门井段近壁流速偏大或与中线流速基本一致^[4]。因此 ,在这种条件下 ,如果按照惯例采用不等间距分流 ,分流效果反而不佳。为了确定进(出)水口上下游在不同工程布置条件下合适的分流间距 ,笔者对试验结果进行了分析研究 ,提出了基于总流分析法的单位流速法 ,以此确定分流间距 ,并获得了良好的效果。单位流速法的主要思路如下 :

a. 根据连续性方程有 $Q_{\text{分流}} = Q_{\text{孔口}}$,其中 $Q_{\text{分流}}$ 为分流墩头部各分流段过流量 , $Q_{\text{孔口}}$ 为进(出)水口口部实测过流量。将分流墩分流间距(位于扩散段起始段面)分成 4 部分 ,每部分过流量 $Q_{\text{分流}}$ 与相应的流道流量 $Q_{\text{孔口}}$ 相等。

b. 用流道流量除以相应的 4 部分中每部分的面积 ,得到平均流速 $\bar{v}_{\text{分流}} = Q_{\text{分流}}/S_{\text{分流}}$,其中 $S_{\text{分流}} = bh$ (b 为分流间距 , h 为分流段高度) 。当进(出)水口分流均匀性欠佳时 ,拟通过调整扩散段起始断面的分流间距来改善分流特性。这时遇到的问题就是在只知道每个分流段的平均流速而不知道具体流场分布的条件下如何调整分流间距。通过计算分析 ,笔者提出了单位流速法。

c. 计算单位流速 : $v_b = \bar{v}_{\text{分流}}/b$,然后调整分流间距 ,调整后的分流间距 $b' = b \pm \Delta$ (Δ 为原分流段增加或减小的微小间距)。

d. 利用每个分流段的单位流速计算调整分流间距后每个分流段的平均流速 $\bar{v}'_{\text{分流}}$:①当 $b' = b - \Delta$ 时 , $\bar{v}'_{\text{分流}} = v_b b'$;②当 $b' = b + \Delta$ 时 , $\bar{v}'_{\text{分流}} = v_b b + v_{b\Delta} \Delta$,式中 $v_{b\Delta}$ 为相邻分流段的单位流速。

e. 计算调整后的各分流段过流量 : $Q_{\text{分流}} = \bar{v}'_{\text{分流}} S'_{\text{分流}}$,其中 $S'_{\text{分流}} = b'h$ 。

由于 $Q_{\text{分流}} = Q_{\text{孔口}}$,因此也就知道了调整分流间距后的孔口过流量。这样只要通过简单运算就可以得出合适的分流间距。之所以采用墩间单位流速是因为单位流速可以反映每个分流段的流动特性 ,在保持各分流段平均流速不变的前提下 ,仅将分流墩分流间距做微小调整。调整后 ,依旧用原来的单位流速乘以相应的分流间距就可以得出调整后的流道流量。

根据表 3 中的单位流速(扩散段起始断面) ,采用上述方法 ,预测采用等间距分流的分流效果 ,计算结果见表 4。对比表 3 和表 4 可知 ,采用等间距分流 ,分流均匀性会有所改善。3 号进(出)水口较 1 号进(出)水口分流效果略显逊色 ,说明 3 号进(出)水口分流不均匀不完全是由分流间距引起的 ,还需考虑其他原因 ,如分流段宽度不够。因此 ,采用上述方法(单位流速法)还可以起到诊断作用。这是因为进(出)水口内的流动为缓流 ,进(出)水口上下游边界条件都会对进(出)水口内的流动产生影响。分流段的流量分布是在特定的上下游边界条件下形成的。根据诊断结果决定 4 个进(出)水口分流段均采用 6.4 m 宽度。

表 4 下库分流墩头部等间距布置进(出)水口流速分布
(流量 639.26 m³/s ,水位 2.95 m)

进(出) 水口	分流 间距/ m	孔口平均 流速/ (m·s ⁻¹)	分流段 平均流速/ (m·s ⁻¹)	单位流速/ (m·s ⁻¹)	分流不 均匀性/ (m·s ⁻¹)
1 号	1.60	0.80	3.06	1.91	0.14
	1.60	0.92	3.54	2.26	0.14
	1.60	1.00	3.83	2.44	0.14
	1.60	0.86	3.30	2.07	0.14
3 号	1.55	0.88	3.49	2.25	0.19
	1.55	0.85	3.36	2.16	0.19
	1.55	0.92	3.65	2.42	0.19
	1.55	0.73	2.89	1.87	0.19

4 下库进(出)水口分流墩头部等间距分流试验结果

根据上述预测结果 ,下库进(出)水口分流墩头部采用等间距布置 ,并加宽了 3 号进(出)水口分流段宽度 ,即与 1 号进(出)水口同宽。表 5 给出了部

试验结果表明下库进(出)水口采用等间距分流后,分流效果较之不等间距分流(表3)有明显改善。2个(实际是4个)进(出)水口流速分布不均匀系数均小于或接近2.0,这是十分优良的指标。

表5 下库分流墩头部等间距布置进(出)水口流速分布
(流量 627.92 m³/s,水位 12.60 m)

进(出) 水口	分流 间距/ m	孔口平均 流速/ (m·s ⁻¹)	分流段 平均流速/ (m·s ⁻¹)	单位 流速/ (m·s ⁻¹)	不均 系数	分流不 均匀性/ (m·s ⁻¹)
1号	1.60	0.79	3.03	1.89	1.50	0.24
	1.60	1.03	3.95	2.47	1.82	0.24
	1.60	0.99	3.80	2.37	1.94	0.24
	1.60	0.87	3.34	2.09	1.63	0.24
3号	1.60	0.91	3.49	2.18	1.46	0.16
	1.60	0.91	3.49	2.18	2.12	0.16
	1.60	0.98	3.76	2.35	1.79	0.16
	1.60	0.82	3.15	1.97	1.55	0.16

5 分流墩布置方式研究

在响水涧抽水蓄能电站上、下库进(出)水口模型试验过程中,对分流墩布置方式也进行了研究。对于三墩四流道侧式进(出)水口,分流墩的布置有3种方式:①三墩齐平布置,即3个墩头均位于扩散段起始断面;②中墩适当退后布置,即2个边墩头部位位于扩散段起始断面,中墩适当退后布置;③2个边墩适当退后布置,中墩位于扩散段起始断面。

目前我国已建抽水蓄能电站中,3种布置方式都有采用^[4-5]。琅琊山抽水蓄能电站下库进(出)水口由于是二机一洞,加之流量较大,进(出)水口体积比较庞大,采用布置方式①,出流平均损失系数为0.27,进流平均损失系数为0.19。布置方式①的特点是分流界限明确,即进(出)水口过流量与分流间距及门井段流动有明确的对应关系。当分流段宽度较大时,可以采用该种布置方式。响水涧抽水蓄能电站上、下库进(出)水口均为一机一洞,进(出)水口体积较小,分流段宽度相对较窄,如果采用布置方式①,则分流段较为拥挤,有可能会增加水力损失。采用布置方式②可以避免这种现象,因为分流段中部流动相对较为平稳,中墩稍许退后不至于影响中部流道分流的均匀性,并可减阻。笔者对响水涧抽水蓄能电站下库进(出)水口分流墩采用布置方式①和布置方式②进行了对比试验。结果表明,同等水位、流量条件下,布置方式①的出流损失系数为0.47,布置方式②的出流损失系数为0.39。采用中墩退后、分流墩头部等间距布置的方案,响水涧抽水蓄能电站下库4个进(出)水口在各级工程运行水位、流量条件下,出流平均损失系数为0.32,进流平均损失系数为0.10。上库进(出)水口分流墩采用同样

的布置方式(布置方式②),分流墩头部不等间距布置4个进(出)水口在各级工程运行水位、流量条件下出流平均损失系数为0.27,进流平均损失系数为0.13。布置方式③涉及边流道分流的均匀性与边墩退后是否减阻的综合效应,有待于进一步探讨。需要说明的是响水涧抽水蓄能电站进(出)水口模型试验没有设置拦污栅,故以上损失系数所反映的是无栅条件下的水头损失。

6 结 语

基于总流分析法^[6],引入单位流速法作为分流间距调整的依据,可以在已知孔口平均流速的条件下,根据连续性方程推测各个分流段的分流量,进而得出分流段的平均流速。各个分流段的平均流速反映了分流段在特定上、下游边界条件下的水力特性,因此在此条件下推求的单位流速可以客观地反映分流段的真实水力特性,用以确定分流间距。

采用单位流速方法得出的试验结果已用于响水涧抽水蓄能电站上、下库进(出)水口工程实际,实践证明该方法物理概念清晰、定量准确,可供工程设计部门参考使用。

致谢:对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表示诚挚的谢意。

参考文献:

[1] 陆佑楣,潘家铮.抽水蓄能电站[M].北京:水利电力出版社,1992.
[2] 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.
[3] 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.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 张长高.水动力学[M].北京:高等教育出版社,1993.

(收稿日期 2010-01-05 编辑 骆超)

