

抽水蓄能电站侧式进/出水口水力设计研究

韩立

(国家电力公司北京勘测设计研究院, 北京 100024)

摘要:对已有的工程设计资料进行综合分析研究,并将基础性研究中的渐扩管与侧式进/出水口的水力特性相联系和沟通,着重阐明扩散段的合理体型、分流隔墙的合理布置原则,提出各孔流道间流量不均匀比小于1.1是体型良好的基本条件。

关键词:进水口;出水口;扩散流动;双向流动;抽水蓄能电站

中图分类号:TV743

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)06-0023-04

1 概述

常见的抽水蓄能电站进/出水口有侧式和井式两种,以侧式为多。侧式进/出水口由扩散段及其末端的拦污栅和防涡梁组成,见图1。在扩散段内由分流隔墙分成几孔流道,其孔数视工程规模和扩散段的平面扩张角而异。从流体运动的角度来说,侧式进/出水口属渐扩管(出流)或渐缩管(进流)^[1],分别相当于抽水蓄能电站的发电和抽水两种工况。对于抽水蓄能电站来说,无论是上库还是下库的进/出水口,都承受双向流动作用。对于给定的进/出水口的水头损失大小而言,则是出流-渐扩流动的大于进流-渐缩流动的。由于上库进/出水口的抽水工况与下库进/出水口的发电工况相当,都属渐扩管出流流动,对于确定进/出水口体型和水头损失大小起关键作用的是这种出流流动。

如图1所示的布置,断面1—1和2—2间的能

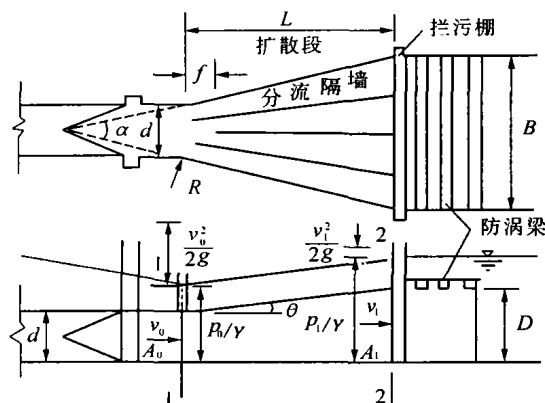


图1 侧式进/出水口布置简图

量方程:

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

式中: v_0 和 v_1 分别为通过断面1—1和2—2的水流流速; p_0/γ 和 p_1/γ 分别为断面1—1和2—2的压力; h_f 为水头损失, $h_f = \frac{\zeta_g v_0^2}{2g}$, ζ_g 为阻力系数,也称水头损失系数。

根据图1,1—1和2—2处的断面面积分别为

$$A_0 = d^2, \quad A_1 = BD$$

且按连续方程可有

$$v_1^2 = v_0^2 \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2$$

于是可有

$$\frac{\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_0}{\gamma}}{\frac{v_0^2}{2g}} = \left(1 - \frac{A_0^2}{A_1^2} - \zeta_g \right) = \eta_g \quad (2)$$

式中: η_g 为静压恢复系数。

从式(2)可得

$$\zeta_g = 1 - \frac{A_0^2}{A_1^2} - \eta_g \quad (3)$$

当 $A_0/A_1 = 1$ 时,有 $\zeta_g = -\eta_g$,即为等断面管道均匀流动的情况。上述推导中均假设断面流速分布系数 $\alpha = 1.0$ 。从式(3)不难看出, $\zeta_g = f(A_0^2/A_1^2, \eta_g)$,而 A_0/A_1 事实上隐含着扩散段长度 L 、顶板(或包括底板)扩张角 θ ,以及 d/D , d/B 等因素,当然也应包括扩散段内分流隔墙所形成的阻力因素。 ζ_g 值只能通过模型试验确定。

从水流运动特性来看,扩散段内的流动属于有

压缓流的扩散阻力问题,就图1所示的工程布置而论,显然与图2所示的矩形断面渐扩管的流动相类似,是一个三维的扩散流动.图2中的扩张角 $\alpha/2$ 相当于图1中的 θ .在雷诺数 $Re > 4 \times 10^5$ 时,矩形渐扩管最佳特性为 $\alpha = 10^\circ \sim 6^\circ$ (相当于图1中的 $\theta = 5^\circ \sim 3^\circ$), $\zeta_g = 0.28 \sim 0.18$, $A_1/A_0 = 4$, $L/d = 5.7 \sim 9.4$ ^[1].这可看作是扩散段内无分离水流且不存在分流隔墙条件下 ζ_g 的“底线数值”.这个“最佳特性”的物理含义是:“为了将管道的小截面过渡到大截面(流体的动能转化为压力能)而且做到尽量减小全压损失,安装平顺扩散的管道——渐扩管.在渐扩管中,当扩张角小于一定值时,随着截面面积的增大其平均流速降低.相对于小(初始)截面上速度的渐扩管的总阻力系数,要比相同长度、横截面等于渐扩管初始截面的等截面的阻力系数小.”^[1]对实际抽水蓄能电站工程的进/出水口而言,由于受工程布置条件制约,扩散段很难符合上述“最佳特性”要求,特别是分流隔墙存在会导致水头损失增加,阻力系数要大于上述“底线数值”是必然的.这样,抽水蓄能电站侧式进/出水口的水力设计研究,是在满足工程布置要求和具有分流隔墙条件下,优化给出具有较小阻力系数的扩散段体型.

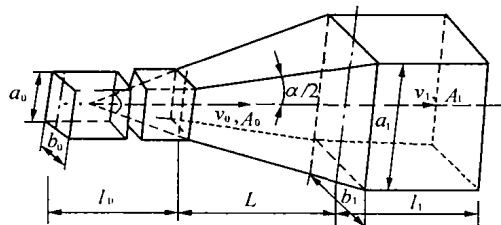


图2 矩形截面渐扩管

2 分析与讨论

2.1 扩散段末端断面的流速分布特征

人们常用扩散段末端断面(口门)上最大点流速 $v_{\max}$ 与断面平均流速 $\bar{v}$ 之比来判别扩散效果的优劣.如图1所示的四孔道侧式进/出水口布置^①,其底顶板双向扩张角均为 2.02° ,每个流道的出口尺寸为 $5.5\text{ m} \times 10.0\text{ m}$,阻力系数 $\zeta_g = 0.43$.在出口断面按图3所示的测点分布施测流速.4台机同时过水时的典型试验成果示于图4.

由图4可以看出:①无负流速出现;②第一孔流道(边孔)的平均流速 $\bar{v}_1 = 0.8314\text{ m/s}$,相邻的第二孔流道的 $\bar{v}_2 = 0.7782\text{ m/s}$, $\bar{v}_2/\bar{v}_1 = 1.108$;③第一孔流道主流集中在左上部,第二孔流道集中在上部偏左,两孔流道的流量分布有明显差异.可见出口(口

门)断面的流速分布相当复杂,用 $v_{\max}/\bar{v}$ 很难反映口门处流速分布的规律性.

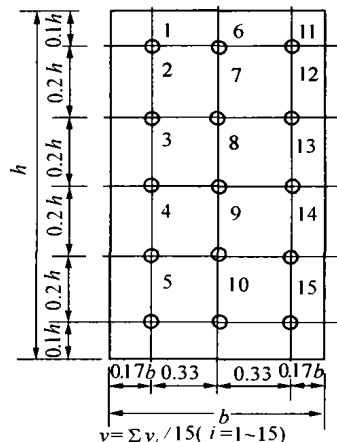


图3 流速测点分布

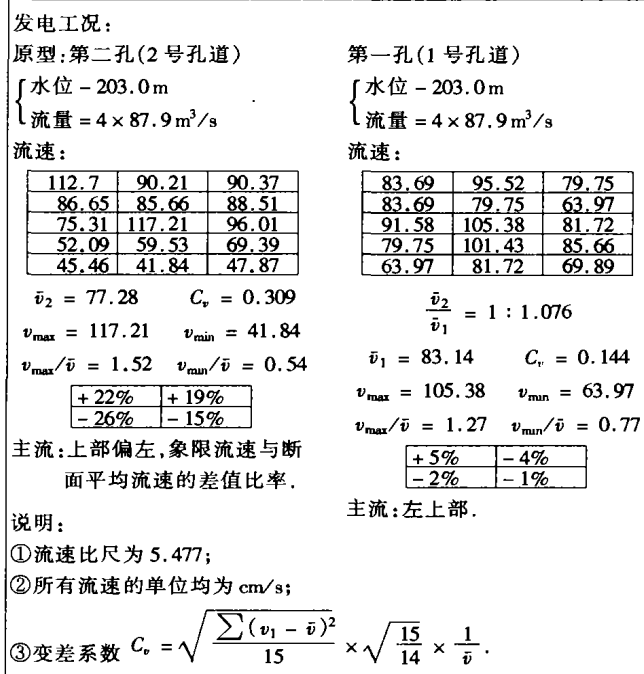


图4 口门流速分布

2.2 水头损失系数 ζ_g

扩散段的水头损失系数 ζ_g (阻力系数),取决于水流状况——扩散冲击、局部分离和局部冲击,其影响参数主要有顶板扩散角 θ (也可是双向扩散),扩散度 η ($\eta = A_1/A_0$),来流条件及下游淹没度等诸多因素;在有分流隔墙构成多孔流道的情况下,各孔道流量分配的均匀程度是更为重要的影响因素.从图1的几何条件不难看出, $\eta = A_1/A_0$ 和 L/d 可以很好地概括这些因素.图5为根据文献[2]的一些工程资料点绘的 $A_1/A_0 \sim L/d$ 关系,反映了一些工程中的应用范围.从中可以得出 $A_1/A_0 = (0.8 \sim 0.9)L/d$,可作为选择扩散段适宜边界条件的参考依据.

①大连理工大学.黑龙江省荒沟抽水蓄能电站工程下池进/出水口模型试验研究,1995.

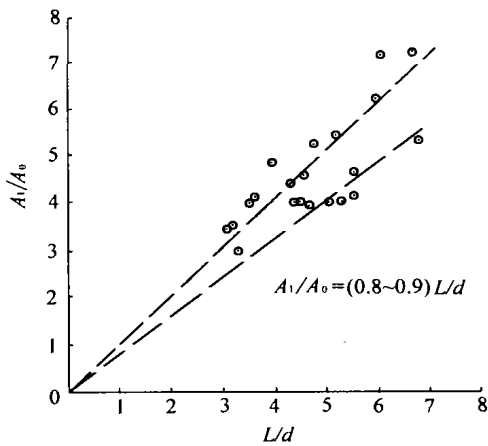


图5 $A_1/A_0 \sim L/d$ 关系

根据对一些工程资料的分析,扩散段末端断面(口门)的平均流速多为 $0.7 \sim 0.8 \text{ m/s}$,较规范^[3]中建议的过栅流速 $0.8 \sim 1.2 \text{ m/s}$ 小,其结果必然导致口门尺寸偏大,给扩张角的合理选择带来困难.建议正常情况下按规范建议合理选取拦污栅过栅流速,只有当来流可能出现明显偏流的情况(如位于尾水管后的拦污栅),才考虑流激振动问题,即使这种状况也不是单靠降低过栅流速所能解决的.

2.3 扩散段内流速分布的调整

扩散段内流速分布的调整要从垂直和平面流速分布两方面进行,两者是相关联的.在有分流隔墙的条件下,应首先着眼于调整平面流速分布,力求使各孔道过流量彼此接近,这是影响水头损失大小的主要因素.

通常扩散段底板坡度一般较小或采用平底,近年来也有的工程采用如图2所示的顶底板双向扩散型式,但多数情况下竖向扩散主要依靠顶板抬升.若顶板扩张不当,很容易在顶部产生水流分离出现负流速.所以,克服顶部负流速使垂线流速分布尽可能均匀,往往是侧式进水口调整流速分布的重要问题.如前所述,对于矩形扩散管,根据大量基础性研究^[1]认为,单向扩散角的适宜值为 $3^\circ \sim 5^\circ$,经分析研究现有一些试验成果,可以认为这个范围是适用的.也有的工程采用 $\theta = 7^\circ$ 左右或更大些,但其阻力系数 ζ_g 偏大,很可能是认为其影响可不计,或试验中流速测点偏少而未测到负流速.例如,十三陵下库进/出水口^①原布置顶板扩张角 $\theta = 6.54^\circ$,顶部仍有 0.5 m/s 负流速.沙河上库进/出水口顶板扩张角 $\theta = 6.86^\circ$,但扩散段前洞身底坡为 4.57° 向上的角度,使扩散段入流水体本身就向上出流,起到了抵消顶板扩张角

偏大的作用,因而无负流速出现.由此可见,来流管道适当向上倾斜对改善扩散段的水流可能是有益的.

经反复试验优化得出的在扩散段接修一段水平顶板整流段的布置是值得推荐的(图6)^②.平顶整流段的作用在于适当减小扩散段长度,即在顶板水流尚未产生分离之前就使之进入起梳整作用的平直段,在该段内不存在扩散段内的压力递增现象,从而起到消除局部负流速,达到平顺水流调整流速分布的目的.事实上也等于减小了有效扩张角,使得真实的扩张角为点A和点C之间的角度,小于AB间的 θ 值.整流段长度为扩散段长度的0.4倍为宜,即 $l/L = 0.4$ (图6).

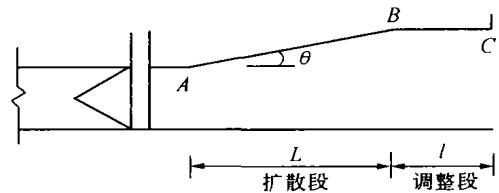


图6 带整流段的侧式进水口

2.4 分流隔墙的布置

分流隔墙的布置是否得当是影响阻力系数大小的关键因素.扩散段内平面流速分布的调整,除应适当选择隔墙头部形状和合理的竖向扩散角度外,调整各孔道的流量分配使之尽可能均匀,在于分流隔墙在首部的合理布置.扩散段起始断面常与来流管道尺寸相同,通常宽度不大,3道或2道隔墙要在这样窄的范围内布置,既要避免过分拥挤,又要起到有效均匀分流作用.

a. 扩散段内分流隔墙的数目,以每孔流道的分割扩张角小于 10° 为宜.

b. 分流隔墙头部形状以尖型或渐缩式小圆头为宜.这是适应减少水头损失和避免在首部布置上过于拥挤所需要的.此外,在扩散段起始处两侧边墙连接处须修圆,见图1.

c. 分流隔墙在扩散段首部合理间距的配置,受来流条件,特别是流速分布影响,而流速分布与布置条件(如有无弯道、底坡、断面变化、门槽等)和边界层发展有关,这正是难以做到使流量在各孔流道达到均匀分配之所在.根据现有的研究成果^[2],对于2隔墙3孔流道的布置,中间孔道宽应占30%,两边孔道占70%;对于常见的3隔墙4孔流道的布置,宜采用中间两孔占总宽的44%,两边孔占56%为宜,或者说单一中间孔道宽度 b_c 与相邻边孔宽 b_s 之比

①国家电力公司北京勘测设计研究院科研所.十三陵抽水蓄能电站专题报告——下池进/出水口水力学模型试验研究报告,1985.

②谭颖.抽水蓄能电站取水口水力特性试验研究专题报告.国家电力公司北京勘测设计研究院科研所,1988.

$b_c/b_s \approx 0.785$. 问题的关键在于3个隔墙在首部如何布置,可能有两种情况:①当上游隧洞直径大(例如10m或更大),那么通常从扩散段前检修门(或事故检修门)的尺寸考虑,可将闸门分为两孔,这样闸孔中墩自然延长到扩散段内将其一分为二.若中墩两侧孔道仍需加设隔墙,那通常是单个隔墙的布置问题.②常见的扩散段内3隔墙4孔流道布置,沙河进出水口试验中^①就隔墙在首部七种布置方案的对比试验结果认为,中间隔墙在首部适当后退形成凹型布置最优,见图7中的方案七.中间隔墙缩短的程度 $f/d \approx 0.5$,见图1.

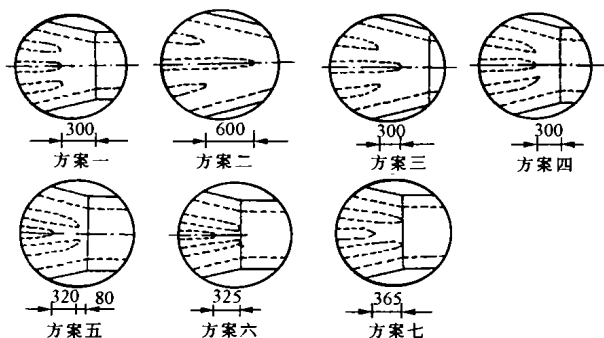


图7 各试验方案分流墩形状与布置(单位:cm)

这种布置的特点是,避免3隔墙齐平于首部形成拥挤不利分流,并使局部水头损失加大,从而有利于各孔流道分流量均匀效果的实现.文献[2]也有这种布置,是值得优先推荐的.当然,其前提是中、边孔在入口处的宽度比例必须适当.

d. 为了进一步阐明各孔道分流量不均匀对阻力系数的影响,选择了表1所示的资料做论证研究.这些资料都已经试验论证,无负流速出现.这些资料来自不同工程布置的试验成果,尽管还有其他影响因素,但相邻的中孔与边孔(或反之)的过流量之比 K 是影响 ζ_g 值大小的主要因素,可初步归纳为: $K < 1.1$, $\zeta_g = 0.34 \sim 0.36$; $K = 1.1 \sim 1.3$, $\zeta_g = 0.42 \sim 0.44$; $K \geq 2$ 时, ζ_g 在0.5以上.

表1 流量不均匀系数 K 与 ζ_g 的关系

ζ_g	K	$\theta/(\circ)$	试验地点
0.34 ~ 0.35	1.06	4.01	十三陵上库进/出水口试验
0.33 ~ 0.36	—	4.74	十三陵下库进/出水口试验
0.43	1.13	2.02	荒沟下库进/出水口试验
0.44	1.14	5.00	响洪甸下库进/出水口试验
0.42	1.31	2.30	沙河上库进/出水口试验
0.44	1.31	6.10	琅琊山上库进/出水口试验
0.55	1.95	2.30	沙河上库进/出水口原方案试验
0.67	2.38	7.23	蒲石河上库进/出水口试验

由图4不难看出,经分流隔墙的水流至口门处

其流速分布很难达到比较均匀的程度,各孔流道间的流量不均匀性必然存在.据此,可以提出一种对分流效果的要求,即 $K < 1.1$ 便可认为是体型良好的侧式进/出水口布置,其 $\zeta_g = 0.34 \sim 0.36$. K 值的增大意味着水头损失增大.为说明此问题,试以图7的方案七为例,其进口宽6.5m, $b_c = 2.86$ m, $b_s = 3.64$ m. 根据模型实测1,2,3,4各孔流道的过流量分别为 $20.4 \text{ m}^3/\text{s}$, $30.2 \text{ m}^3/\text{s}$, $27.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $22.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 中间两孔道 $Q_c = 57.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 相应的 $v_c = 3.09 \text{ m/s}$, $v_c^2/(2g) = 0.49$ m; 两边孔 $Q_s = 42.5 \text{ m}^3/\text{s}$, $v_s = 1.8 \text{ m/s}$, $v_s^2/(2g) = 0.165$ m. 按入口总断面来计算平均流速, $\bar{v} = 100/(6.5 \times 6.5) = 2.37 \text{ m/s}$, 相应的 $\bar{v}^2/(2g) = 0.29$ m. 而 $v_c^2/(2g)$ 与 $v_s^2/(2g)$ 的平均值为0.33 m, 这个值为0.29 m的1.13倍. 这个多出的13%就是相应于流量分布不均匀中间孔道流速加大所造成的“附加损失”. 试验给出的 $\zeta_g = 0.419$ 显然大于13%, 而 $0.419/1.13 = 0.37$ 才是分流均匀状态下应有的 ζ_g 值, 这个值接近上述建议的 $K < 1.1$ 的 $\zeta_g = 0.34 \sim 0.36$ 的值.

3 结 语

抽水蓄能电站侧式进/出水口的设计研究积累了大量经验,但尚缺乏从工程应用角度出发的系统性研究成果,更有待计算分析方面的开发研究与之相辅. 本文从已有的工程设计研究资料中加以总结研究,并将基础性研究的渐扩管与工程应用加以联系和沟通,从工程应用研究着手,对一些问题进行概括和研究,特别着重阐明了扩散段的合理体型,分流隔墙的合理布置及其影响.

参考文献:

- [1] 华绍曾,杨学宁.实用流体阻力手册[S].北京:国防工业出版社,1985.
- [2] 福原华.抽水蓄能电站进/出水口的水力设计[J].电力土木,1979,54(7):48~57.
- [3] SD303-88,水电站进出水口设计规范[S].

(收稿日期:2001-11-20 编辑:张志琴)



①河海大学水电学院.江苏溧阳沙河抽水蓄能电站上库及进/出水口水工模型试验研究,1997.