文章编号：2097-096X(2022)-06-0516-07

大石峡水电站进水口叠梁门分层取水试验研究

张文远，杨　帆，章晋雄，张宏伟
(中国水利水电科学研究院 水力学所，北京　100038)

摘要：为分析电站进水口采用叠梁门型式分层取水方案的可行性，本文通过 1∶21.05 的水工模型对大石峡水电站叠梁门分层取水进水口水力特性进行了系统研究。主要研究内容包括对不同叠梁门高度取水时，进水口的水流流态、叠梁门体的压力分布、叠梁门顶及竖向流道的流速分布、进水口段总的水头损失系数等。试验结果表明：电站进水口设置叠梁门后，叠梁门顶水头大于 18.0 m 时不产生有害吸气旋涡，门体压力分布接近静水压力分布；进水口段的水头损失在 1.17~1.30 m 之间；靠近叠梁门门顶部位的水流流速较大，表层水流流速较小；叠梁门后不同高程竖向流道的水流流速接近于梯形分布，主流偏于进水塔靠下游挡墙侧。在进水口设置叠梁门进行分层取水方案是可行的。

关键词：大石峡水电站；叠梁闸门；分层取水；水力特性；水头损失
中图分类号：TV132　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13244/j.cnki.jiwhr.20220034

1　研究背景

为了环保和下游水生态保护的需要，修建大中型水电站时，在电站发电流道进水口设置分层取水设施已成为一种趋势，即满足电站发电取水需要又达到取表层水提高下泄水温保护生态的目的。在国内外已建或在建的水库采取的改善下泄水温的工程措施中主要有修建分层取水建筑物、打破温跃层和水利生态调度等。水电站进水口分层取水建筑物根据水库规模和取水目的主要有高低取水口、多层取水口、隔水幕、叠梁门等多种方案。针对分层取水型式的研究，美国在二十世纪五六十年代先后对沙斯塔、俄马、格兰峡等电站进水口分别进行了叠梁门分层取水的研究和改建工作[1-3]。我国在二十世纪六十年代中期开始在一些中小型水库中采用分层取水建筑物，主要用于提高灌溉水温。近二十年来随着我国高坝大库的不断增多，以下游生态保护和农业灌溉为目标的大型水库分层取水措施研究成为重点。中国电建集团贵阳院的邵凌峰等[4]和中水北方勘测设计研究有限责任公司范志国等[5]，对大中型水电站分层取水方案取水效果、工程投资、优缺点等方面进行比较分析；中国水科院章晋雄等[6]、武汉大学雷艳等[7]、长科院王才欢等[8]、天津大学高学平等[9]、国网新源控股有限公司路振刚[10]、中国水科院柳海涛等[11-13]从模型试验和数值模拟两个方面对电站进水口采用叠梁门分层取水结构的水力特性、水温分层及取水效果等进行了系统研究，取得了丰硕的成果，为工程的设计和运行提供了指导。由于电站进水口设置叠梁门分层取水后，虽然在提高下泄水温，改善生态环境等方面有显著效果，但进水口水流条件较不设置叠梁门时取水复杂，可能出现跌流、吸气漩涡等不良流态和增大水头损失，降低机组的运行效率。因此验证和优化叠梁门分层取水进水口的布置是十分必要的。

本文以大石峡水利枢纽电站进水口为研究背景，对电站进口的水力特性进行了系统的模型试验研究。大石峡水利枢纽工程水库正常蓄水位 1700 m，拦河坝最大坝高 247 m，电站装机容量为 750 MW。枢纽工程主要由混凝土面板砂砾石坝、电站进水口、岸边溢洪道、中孔泄洪排沙洞、放空兼排沙洞、生态放水孔等建筑物组成。电站进水口按两孔一塔布置型式，3 个进水塔共 6 孔，叠梁门后为通仓流

收稿日期：2022-02-06；网络首发时间：2022-08-11
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1788.TV.20220810.0919.001.html
基金项目：国家自然科学基金项目(51909278)；中国水科院基本科研业务费专项(HY110145B0022021)
作者简介：张文远(1980-)，正高级工程师，主要从事水工水力学相关工作。E-mail：zhangweny8@163.com

道设计。进水口由拦污栅段、叠梁门段、竖井连接段、闸室段组成，进水口底板高程为 1619.00 m，每个进水口设两孔拦污栅，每孔拦污栅孔口尺寸为 5.5 m×83.2 m。拦污栅后布置叠梁门，叠梁门最大挡水高度为 1679.00 m 高程，孔口尺寸为 5.5 m×60 m，门叶分为 12 节，每节高度为 5 m。叠梁门墩后为通仓流道，通仓流道后为闸室段，闸室段设置有平板检修闸门槽和事故闸门槽各一道，引水隧道内径为 6.00 m，发电流道进水口布置见图 1。

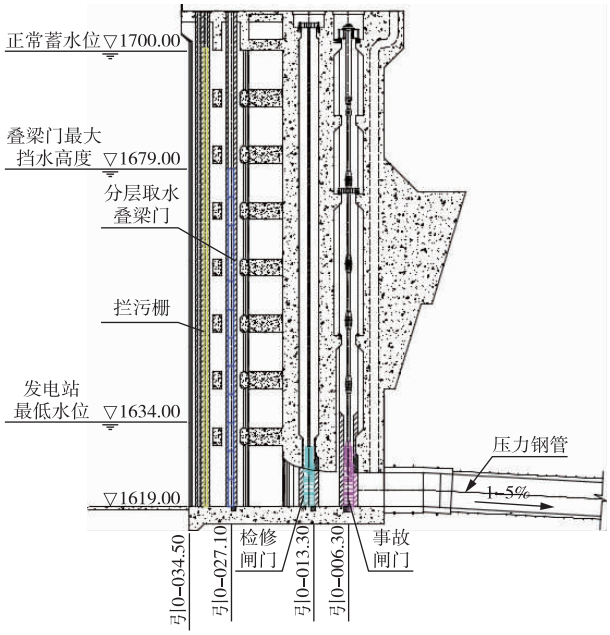

图 1　电站进水口布置示意图

2　模型设计及测量设备

2.1　模型设计　大石峡水利枢纽电站进水口水工模型比尺为 1∶21.05，按重力相似准则设计。进水塔、叠梁挡水闸门、快速事故门槽、渐变段等部分的模型全部采用有机玻璃精细加工制作，渐变段后引水洞采用 PE 管制作。试验中观测了典型组合试验工况(见表 1)下，进水口的水流流态、压力和流速分布以及水头损失等内容。

表 1　不同组合试验工况

试验工况	底板及叠梁门顶高程/m	最低控制水位/m	单机发电流量/(m^3/s)
无叠梁门	1619.0	1634.0	148.1
六层叠梁门取水	1649.0	1664.0	148.1
八层叠梁门取水	1659.0	1674.0	148.1
十层叠梁门取水	1669.0	1684.0	148.1
十二层叠梁门取水	1679.0	1694.0	148.1

2.2　测量设备　叠梁门、闸墩及进水口边墙上的动水压力测量采用中国水利水电科学研究院研制的 DJ800 型压力传感器及数据采集系统，其量程为 0.0~70.0 kPa，满量程相对误差 0.1%；流量测量采用天津延辉仪表通讯有限公司研制的电磁流量计进行测量，量程为 0.0~1000.0 m^3/h，测量精度为 0.5%；进水口段水头损失中的测压管水头采用测压排进行测量，精度 0.1 mm；叠梁门顶及拦污栅槽内的流速分布采用荷兰生产的 P-EMS 型电磁流速仪测量，量程为 0.0~2.5 m/s，测量精度±0.001 m/s。

3　进水口水流流态

进水口不放置叠梁门，在最低发电运行水位 1634.00 m(进口淹没水深 15 m)运行时，进水口没有产生漩涡吸气的恶劣流态，能够基本满足电站正常发电引水的要求。进水口设置 2 层、4 层及 6~12 层叠梁门(每层叠梁门高度 5 m)取水，三台机组发电流量均为 148.1 m^3/s 的运行条件下：叠梁门顶水深在 18.0 m 以上时，电站进口来流均较平稳，叠梁门后基本无漩涡或仅出现较弱的表面小漩涡，来流能够较为平顺地经叠梁门顶和竖向流道流入引水管道；叠梁门顶水深为 13.8~15.0 m 时，进水塔 2#和 3#孔叠梁门下游闸墩后出现明显较强的喇叭状漩涡(照片 1)；叠梁门顶水深为 11.2~13.1 m 时，流道内出现不间断吸气漩涡，下游引水管内观测到气泡吸入(照片 2)；叠梁门顶水深为 8.5~11.1 m 时，叠梁门后呈临界跌流形态；叠梁门顶水深越低，水流跌落程度越大，水面越紊乱，吸入下游管道的气泡越多。

试验中发现进口叠梁门后通仓流道内左、右两侧闸墩附近纵撑宽度为不对称布置时，1#和 2#进水孔之间闸墩(纵撑宽度 1.5 m)附近漩涡尺度及强度大于 2#和 3#进水孔之间闸墩附近的漩涡(纵撑宽度 3.0 m)。1#和 2#进水孔之间闸墩后纵撑宽度调整为 3.0 m 后，能消减闸墩后通仓流道内的漩涡尺度及强度。进水口通仓流道内纵横撑结构有消涡和稳定流态的作用，纵撑设计采用对称布置形式对进口水流流态更有利。

照片 1　2#和 3#进水孔闸墩后漏斗漩涡

照片 2　引水流道内的气泡

4　叠梁门体压力分布

机组正常引水发电时，叠梁门下游侧测点的时均压力值及脉动压力均方根值见表 2 和表 3，中孔及边孔时均压力分布图见图 2 和图 3 所示。各组实验工况下沿中心孔和边孔叠梁闸门下游侧中心线的动水压力测点时均压力值随测点高程的降低而线性增大，时均压力分布形状与静水压力分布相似，相同高程不同部位测点的时均压力值基本相同。同一测点随上游水位升高其动水压力也相应增大，压力增大值与水深增加值接近。由此可见，机组正常运行时作用于叠梁门上各测点的时均压力主要取决于测点以上的水深。各组典型试验工况下，叠梁门下游侧测点脉动压力的均方根值在 0.19~3.07 kPa 之间的较小值范围内。水流经过叠梁门顶跌落竖向流道后，叠梁门后水流紊动较小，水流总体比较平稳。

5　叠梁门顶及竖向流道流速分布

对进水塔中心线一侧 3 孔叠梁门顶以上及相应拦污栅槽位置不同高程位置流速分布以及边孔和中心孔叠梁门后高程为 1653.0 m 和 1644.0 m 竖向流道流速分布进行了测量分析。典型工况叠梁门顶、拦污栅槽及竖向流道的流速分布见图 4。

表 2　机组正常引水时叠梁门下游侧测点的时均压力值　（单位：kPa）

	水位/m	测点号							
		G1	G2	G3	G4	G9	G10	G11	G12
6 层叠梁门	1667.0	454.0	433.3	377.5	312.4	454.8	432.9	379.2	312.3
	1672.0	503.0	485.4	428.5	362.7	505.8	485.0	428.0	362.9
8 层叠梁门	1677.0	552.0	532.2	473.4	408.8	551.6	531.9	472.8	409.5
	1682.0	600.0	581.5	521.6	460.2	601.6	581.3	521.7	459.8
10 层叠梁门	1687.0	652.6	630.1	573.7	504.2	651.3	629.1	572.9	504.8
	1692.0	698.8	680.2	621.8	555.8	702.0	679.1	623.0	555.3
12 层叠梁门	1697.0	745.4	729.8	672.4	605.2	752.2	733.0	672.0	605.8
	1700.0	775.5	758.7	701.5	633.6	776.8	758.2	701.2	633.7

表 3　机组正常引水时叠梁门下游侧测点脉动压力均方根值　（单位：kPa）

	水位/m	测点号							
		G1	G2	G3	G4	G9	G10	G11	G12
6 层叠梁门	1667.0	0.57	0.32	0.33	0.23	0.47	0.31	0.37	0.25
	1672.0	0.44	0.37	0.34	0.27	0.46	0.31	0.83	0.23
8 层叠梁门	1677.0	0.35	0.34	0.33	0.29	0.42	0.70	0.36	0.24
	1682.0	0.60	0.35	0.33	0.27	0.43	0.31	0.24	0.24
10 层叠梁门	1687.0	0.53	0.40	0.35	0.20	0.40	0.41	1.88	0.26
	1692.0	0.79	1.19	0.36	0.80	0.50	0.23	3.07	0.26
12 层叠梁门	1697.0	0.44	0.43	0.43	0.24	0.44	0.47	0.75	0.28
	1700.0	2.15	0.48	0.62	0.29	0.45	0.47	1.24	0.27

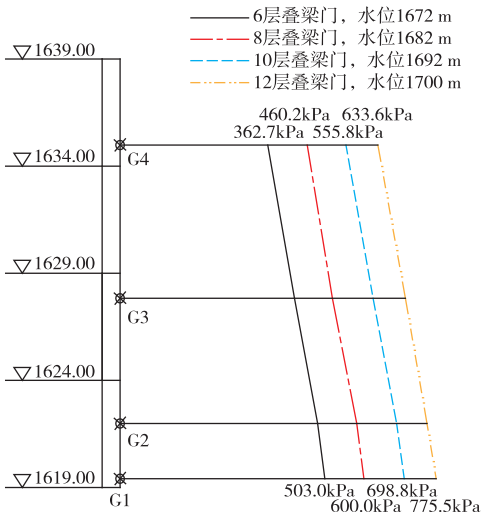

图 2　中心孔叠梁门体压力分布图

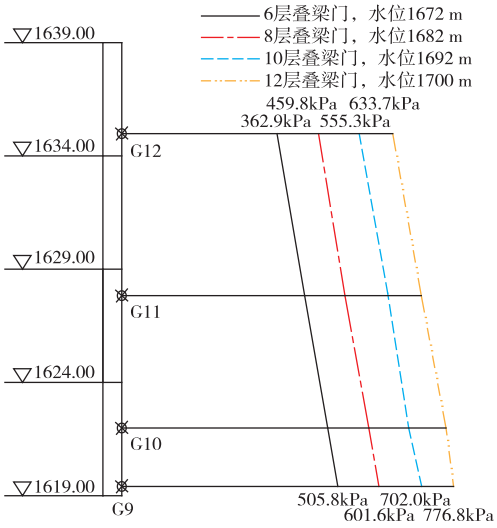

图 3　右边孔叠梁门体压力分布图

由测量结果及图 4 分析可知，同一组试验工况下，3 孔拦污栅槽、叠梁门顶中心线处及不同高程竖向流道的流速分布规律及大小基本接近；不同取水工况下实测拦污栅槽的平均过栅流速在 0.46~1.05 m/s 之间，拦污栅过栅流速小于 1.2 m/s，满足《水利水电工程进水口设计规范》（SL285—2018）的相关要求；六层至十二层叠梁门取水工况下，叠梁门上方靠近叠梁门门顶部位的水流流速较大，实测最大水流流速在 1.73~2.47 m/s 之间。表层水流流速较小，且随门顶水深增大而减小，流速值在 0.5 m/s

以下；叠梁门后不同高程竖向流道的水流流速分布接近于梯形，主流偏于进水塔靠下游挡墙侧，竖向最大流速值在 2.36~2.91 m/s 之间，竖向水流方向同一桩号位置测点的流速值相差大多小于 10%。

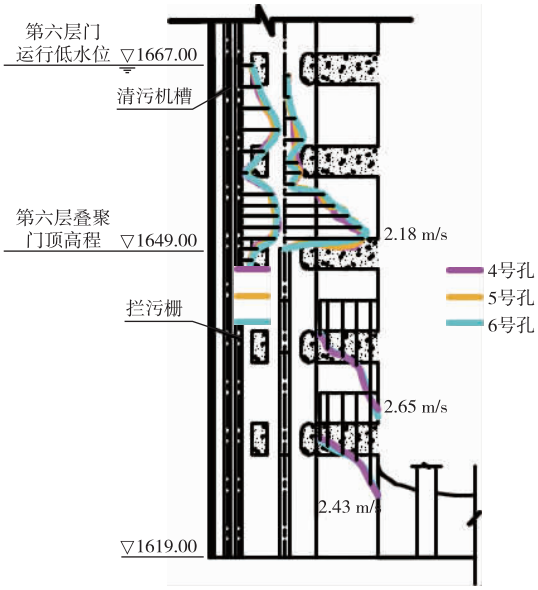

图 4　进水口段拦污栅槽、叠梁门顶及竖向流道流速分布图(6 层叠梁门取水，水位 1667.0 m)

6　进水口段水头损失

根据拦污栅结构的设计图纸，拦污栅的纵横梁支撑结构以及单根栅条的宽度按照几何相似采用不锈钢条焊接而成，栅条的总数量与原型拦污栅的栅条数量相同，同时确保模型拦污栅条的阻水面积与原型相似。模型中以渐变段后 1.5 倍管道直径处为参考断面，测量了不设叠梁门和设置不同层数叠梁门情况下进水口段(从拦污栅至渐变段末端)的总水头损失，进水口段的水头损失(h_j)按式(1)计算：

$$h_{ji}=\left(H_0+\frac{V_0^2}{2g}\right)-\left(H_i+\frac{V_i^2}{2g}\right) \tag{1}$$

式中：H_0为进口上游库区(0-0 断面)的测压管水头，m；H_i(i=1，2，3)分别为 1#、2#和 3#引水管道渐变段后参考断面(1-1、2-2、3-3 断面)的测压管水头，m；V_0、V_i分别为测量断面的平均流速，m/s，其中进口前 0-0 断面的行进流速忽略不计。根据式(1)，取 1-1、2-2 和 3-3 断面为参考断面，1#、2#和 3#机组进水口段的水头损失系数 δ 可按式(2)计算：

$$\delta_i=h_{ji}\Big/\left(\frac{V_i^2}{2g}\right)=\left[\left(H_0+\frac{V_0^2}{2g}\right)-\left(H_i+\frac{V_i^2}{2g}\right)\right]\Big/\left(\frac{V_i^2}{2g}\right) \tag{2}$$

试验水体温度约 10 ℃，水体运动黏滞系数 1.306×10^{-6} m^2/s，以引水管道直径作为特征长度。控制叠梁门顶以上水深不低于 18.0 m，不同试验工况下进水口段的水头损失系数见表 4。由测量结果分析可知：(1)拦污栅槽内不放置拦污栅，电站正常发电运行工况下，进口不放置叠梁门时，三机联合发电运行时进水口段水头损失系数的平均值为 0.531。(2)进水口放置叠梁门后的水头损失相比不放置叠梁门时明显增大，放置六层叠梁门时的水头损失系数是不放置叠梁门时水头损失系数的 2.12 倍；随着叠梁门层数及高度的增加，进水口段的水头损失呈小幅度增大的趋势。(3)三机联合发电条件下，进水口分别放置 6、8、10、12 层叠梁门运行时，进水口段的平均水头损失系数分别为 0.833、0.864、0.896 和 0.930，进口段的水头损失分别为 1.17 m、1.21 m、1.25 m 和 1.30 m。叠梁门每增加两层(每层 5 m 高度)，进口段的水头损失系数相对增加 3.7%~4.6%。(4)相同试验工况下，将拦污栅放入拦污栅槽内，实测拦污栅引起的局部水头损失系数在 0.033~0.051 之间，拦污栅对进水口总水头损失的占比相对较小。

表 4　进水口段有无拦污栅水头损失系数

运行条件	无拦污栅	放置拦污栅			
水头损失系数 δ_i	平均值	δ_1(1#引水管)	δ_2(2#引水管)	δ_3(3#引水管)	平均值
不放置叠梁门	0.531	0.585	0.579	0.581	0.582
6 层叠梁门	0.833	0.886	0.883	0.876	0.882
8 层叠梁门	0.864	0.910	0.914	0.906	0.910
12 层叠梁门	0.930	0.976	0.953	0.958	0.962

7　结论

本文对大石峡水电站叠梁门分层取水进水口水力特性进行了 1∶21.05 的水工模型试验研究，量测和分析了对不同叠梁门高度取水时的进水口的水流流态、叠梁门体的压力分布、叠梁门顶及竖向流道的流速分布、进水口段总的水头损失系数，本项研究工作的主要结论如下：

(1)电站进水口设置叠梁门取水后，叠梁门顶水头在大于 18 m 情况下，进口水流平顺稳定，水流从叠梁门顶经两次九十度转弯进入引水管道后，水流能迅速得到调整趋于均匀，且叠梁门结构型式简单，因而在进口设置叠梁门实现分层取水的方案是可行的。

(2)机组正常运行时，叠梁门体压力分布近似静水压力分布，作用于叠梁门上的时均压力主要取决于测点以上的水深，叠梁门后水流紊动较小，脉动压力的均方根值小于 3.5 kPa。

(3)拦污栅槽的平均过栅流速在 0.46~1.05 m/s 之间，满足水利水电工程进水口设计规范的相关要求。叠梁门顶上方靠近叠梁门门顶部位的水流流速较大，最大流速值在 1.73~2.47 m/s 之间。叠梁门后不同高程竖向流道的流速分布相似，最大值在 2.36~2.91 m/s 之间。

(4)拦污栅引起的局部水头损失系数在 0.033~0.051 之间，拦污栅对进水口总水头损失的占比相对较小。不放置叠梁门时进水口段的水头损失系数为 0.582，放置六至十二层叠梁门后，水头损失系数从 0.882 增大到 0.962，叠梁门每增加两层(每层高度 5 m)，进口段的水头损失系数相对增加 3.7%~4.6%，叠梁门对进水口总水头损失的占比相对较大。

(5)通仓流道进水口纵横撑结构有消涡和稳定流态的作用，纵撑设计采用对称布置形式对进口水流流态更有利。

参　考　文　献：

[1] BOHAN J P, GRACE J L. Selective Withdrawal from Manmade Lakes[R]. Vicksburg: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1973.

[2] KUBITSCHEK J. Hungry Horse Selective Withdrawal Hydraulic Model Study[R]. Washington: U.S. Department of the Interior, 1994.

[3] RYAN T, TODD C, NICOL S. Implications of Cold Water Releases for Freshwater Fish Populations[C]// Proceedings of the ANCOLD 2002 Conference on Dams: Dams-Future Directions in Demanding Environments. Adelaide, Brisbane, 2002: 1-9.

[4] 邵凌峰，张悦，申显柱，等. 大中型水电站分层取水方案分析[J]. 小水电，2019(5)：14-16.

[5] 范志国，郑向晖，刘国军，等. 新型分层取水结构的研究与应用[J]. 水利水电技术，2017，48(10)：103-108.

[6] 章晋雄，张东，吴一红，等. 锦屏一级水电站分层取水叠梁门进水口水力特性研究[J]. 水力发电学报，2010，29(2)：1-6.

[7] 雷艳，李进平，求晓明，等. 大型水电站分层取水进水口水力特性的研究[J]. 水力发电学报，2010，29(5)：209-215.

[8] 王才欢，段文刚，聂艳华，等. 水电站进水口分层取水水力特性模型试验研究[J]. 水力发电学报，2013，

32(5)：122-128.
[9] 高学平，彭娴，韩云鹏，等. 水电站多层进水口水力特性数值模拟研究[J]. 水力发电学报，2015，34(3)：90-95.
[10] 路振刚，孙双科，刘志国，等. 丰满水电站重建工程叠梁门分层取水进水口取水效果研究[J]. 水利水电技术，2017，48(3)：82-85.
[11] 王岑，柳海涛，王继保，等. 分层取水结构型式对取水水温影响的试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2021，19(2)：262-268.
[12] 段文刚，黄国兵，侯冬梅，等. 大型电站叠梁门分层取水进水口水力特性研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2015，13(5)：380-384，390.
[13] 高学平，宋清林，孙博闻. 控制幕运行方式改善下泄水温及其成因研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2018，16(1)：45-52.

Model tests on the multi-level power intakes of Dashixia Project

ZHANG WenYuan，YANG Fan，ZHANG Jinxiong，ZHANG Hongwei
(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*，*Beijing* 100038，*China*)

Abstract：In order to analyze the feasibility of application of the stop-log-gate at the water intake，the hydraulic characteristics of the multi-level intake flow in Dashixia Hydropower Station was studied based on a 1/21.05 hydraulic model test. In this test，the intake flow pattern，the pressure distribution on the intake gate，the flow velocity above the gate and in the vertical flow passage，as well as the total water head loss through the intake，were studied under normal power generation and water diversion conditions. The tests show that no harmful suction vortex is detected when the water head over the gate is greater than 18.0 m，and the pressure distribution is close to the hydrostatic pressure distribution. When the head loss of the intake section is between 1.17 m and 1.30 m，the flow velocity near the top of the stop-log-gate is larger，and the surface flow velocity is smaller. The flow velocity in the vertical channel at different elevations downstream of the stop-log-gate is close to the trapezoid distribution，and the main flow is inclined to the side of the intake tower near the downstream retaining wall. Through the relevant model test，the feasibility of the application of the stop-log-gate at the water intake is verified.

Key Words：Dashixia Hydropower Station；stop-log gate；multi-level intakes；hydraulic characteristics；water head loss

（责任编辑：王学凤）