

高水头环形隔墩堰竖井泄洪洞水力特性试验研究

王芳芳¹, 刘明², 祝维卫², 樊顾飞¹, 吴修锋¹, 吴时强¹

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对抽水蓄能电站高落差、小泄量、库区静水的泄洪特点,基于“环形隔墩堰跌流+马蹄型消能井+退水压坡”的跌流式竖井泄洪消能系统,建立比尺为 1:25 的竖井泄洪洞物理模型开展了环形隔墩堰堰流特性与竖井系统消能性能研究。试验结果表明:环形隔墩堰综合流量系数为 0.4~0.5,可有效控制库区水流对称跌流入井,形成脱壁流消除壁面空化风险并增强井内通气能力;消能井与压坡段协同作用显著提升了消能率和整流效果,马蹄型消能井结构表现出较优的水流消能性能和退水流态稳定性;竖井系统消能率高达 88% 以上,并随泄量减小而提升。

关键词:竖井泄洪洞; 环形隔墩堰; 消能井; 压坡段; 能量耗散; 物理模型试验

中图分类号:TV651.1⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)06-0026-06

Experimental study on hydraulic characteristics of high-head shaft spillway with circular guide-pier weir//WANG Fangfang¹, LIU Ming², ZHU Weiwei², FAN Gufei¹, WU Xiufeng¹, WU Shiqiang¹(1. *Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China*)

Abstract: According to the flood discharge characteristics of pumped-storage power plants, such as high head, low discharge, and static reservoir water, a 1:25-scale physical model of a shaft spillway was established based on the shaft system consisting of a circular guide-pier weir, a horseshoe-shaped stilling shaft and a pressurized sloped section, and the flow characteristics of the circular guide-pier weir and the energy dissipation performance of the shaft system were investigated. The experimental results show that the comprehensive discharge coefficient of the circular guide-pier weir ranges from 0.4 to 0.5, effectively ensuring symmetrical flow entry into the shaft and forming detached-wall jets to eliminate wall cavitation risks and enhance air entrainment. The synergistic operation between the stilling shaft and the pressurized sloped section significantly improves energy dissipation efficiency and flow control performance. The horseshoe-shaped stilling shaft demonstrates superior energy dissipation performance and downstream flow regime stability. The energy dissipation rate of the shaft system exceeds 88%, and increases as the discharge decreases.

Key words: shaft spillway; circular guide-pier weir; stilling shaft; pressurized sloped section; energy dissipation; physical model test

随着抽水蓄能电站在调峰调频、能量转换与电力系统稳定运行中的核心作用日益凸显,其配套泄洪系统的安全性与适应性设计逐渐成为关键技术问题。对于布置在落差大、库容小的山地抽水蓄能电站,泄洪建筑物常呈现高落差、小泄量、静水入流等典型特征,泄洪系统通常采用无闸门控制的竖井泄洪洞或岸边溢洪道等结构形式,以简化运行调度流程、降低运行风险,并提升泄洪设施的整体运行可靠性^[1-2]。

竖井泄洪洞可以结合导流洞改建,具有布置灵活、开挖量小、环境扰动少、消能率高和雾化危害小等优点^[3-5],尤其适用于高落差、小泄量等复杂地形

水文条件。近年来,竖井泄洪洞在高水头抽水蓄能电站中的应用日益受到关注,但竖井内部水流流速高,常伴随空化空蚀、水气回爆、井喷等复杂水力难题^[6-10],在高水头大泄量条件下,其应用仍受到显著限制^[3,11-12]。目前,我国实际运行的竖井泄洪洞案例仍较有限,主要集中在常规水电工程(如大石门^[13-14]、公伯峡^[15])及抽水蓄能电站工程(如广东清远^[11]、安徽绩溪^[16])。

近年来,国内外学者对竖井泄洪洞水力特性进行了大量研究。根据泄洪过程中水流流态特征,竖井泄洪洞可分为旋流式与跌流式两类,其中以旋流式应用最为广泛。研究表明,竖井进口段和消能退

水段的水力条件最为复杂,直接关系到竖井泄洪系统的运行安全。在进口结构方面,工程中多采用无隔墩的喇叭环形实用堰,但该结构易引发进水口漩涡和壁面负压,在高流速作用下存在严重的空化空蚀风险,需配套设计复杂的掺气设施^[13,17-19]。董兴林等^[11]在传统喇叭环形堰基础上引入旋流墩,提出了旋流喇叭堰结构,在广东清远抽水蓄能电站工程得到成功应用,并在广西贵港抽水蓄能电站设计中开展了进一步研究^[20]。但该堰结构的综合流量系数仅为约0.223^[11],一定程度上限制了竖井系统的整体泄流能力。针对抽水蓄能电站泄洪水力特点,雷显阳等^[16]提出了一种设有多个中心对称隔墩的环形薄壁堰结构,采用跌落式消能方式,结构体型简单易施工,为此类工程提供了新的设计思路。随着我国抽水蓄能电站建设的大规模推进,包括天台、桐庐、景宁、永嘉、江山、紧水潭等多个工程的建设方案均采用并发展了这种跌流式竖井泄洪系统。其中,景宁抽水蓄能电站最大泄洪水头高达约179 m,永嘉抽水蓄能电站最大泄量约540 m³/s。近年来,在工程实践中逐渐形成了一种复合型竖井结构体系:“环形隔墩堰跌流+马蹄型消能井+退水压坡+洞外消力池”,代表了跌流式竖井泄洪结构的新发展趋势。然而,上述多数工程目前仍处于建设阶段,尚无该类结构在实际运行中的水力性能和可靠性表现的公开报道。

本文依托某抽水蓄能电站工程,以“环形隔墩堰跌流+马蹄型消能井+退水压坡”的竖井泄洪系统为研究对象,采用物理模型试验方法,开展了环形隔墩堰堰流特性与竖井系统消能性能研究,旨在为高水头抽水蓄能电站泄洪系统的安全运行与结构优化设计提供技术支撑。

1 研究方法

某抽水蓄能电站工程水库泄水建筑物均采用了

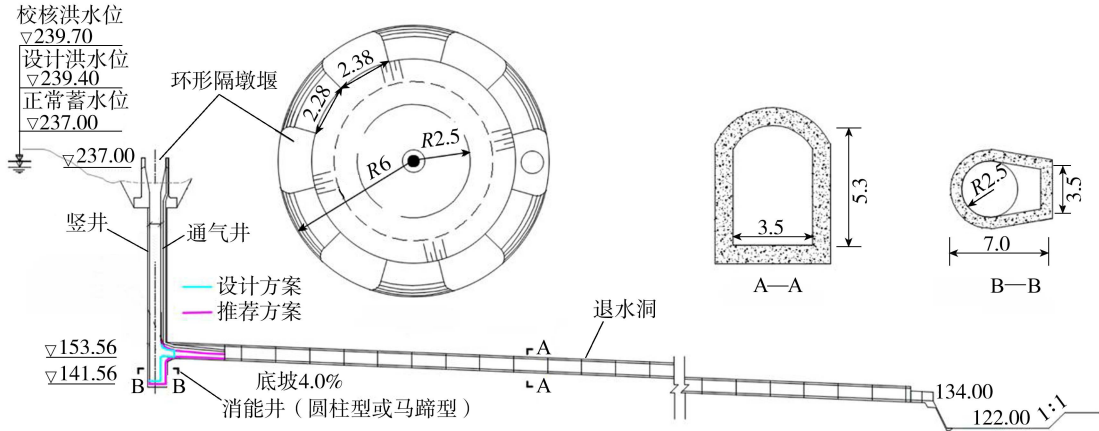


图1 某抽水蓄能电站工程跌流式竖井泄洪洞(单位:m)

跌流式竖井泄洪洞。竖井泄洪洞由溢流堰、竖井、消能井、退水洞、消力池等建筑物组成(图1)。其竖井系统采用了“环形隔墩堰跌流+马蹄型消能井+退水压坡”新型组合结构,溢流堰为环形隔墩堰,堰顶高程237.00 m(同正常蓄水位),堰体上均匀设置了6个中心对称的分流墩,将溢流堰平均分割成6个溢流孔,每个孔口宽2.28 m,过流总宽13.68 m。竖井段横截面为圆形,直径5 m,竖井最大落差约98 m。消能井横截面推荐采用马蹄型断面,压坡段上下壁面均采用椭圆形过渡,压坡段长度28.1 m。退水洞断面采用城门洞型,尺寸为3.5 m×5.3 m,退水洞底坡坡度4.0%,退水洞在起点位置设置直径1.00 m的通气孔。退水洞后接消力池,消力池底板高程122.00 m。本文重点聚焦该竖井泄洪洞“环形隔墩堰跌流+马蹄型消能井+退水压坡”系统,对其水力特性开展研究。

泄水建筑物校核洪水重现期为2 000 a,设计洪水重现期为200 a,消能防冲洪水重现期为100 a,典型洪水条件下竖井泄洪洞运行水头H和泄量Q如表1所示,其中运行水头取为远区库水位与堰顶高程的差值,忽略行近流速。

表1 水流控制条件

工况	H/m	Q/(m ³ /s)	洪水条件
Z1	2.7	125	校核工况
Z2	2.4	103	设计工况
Z3	2.1	82	100年一遇
Z4	1.3	39	20年一遇
Z5	0.7	12	5年一遇

建立了几何比尺为1:25竖井泄洪洞正态水工模型,满足重力相似准则要求。模型库区采用8 m高架钢板制作,竖井泄洪洞建筑物均采用透明的有机玻璃材料制作,有机玻璃材料的实际糙率为0.007~0.008,按照比尺换算得到模拟原型糙率为0.012~0.014,与实际混凝土材料的表面糙率十分

吻合,满足模型试验相似性要求。试验中采用循环水流,泄量采用高精度电磁流量计计量与控制,流态采用单反相机拍摄记录,水位采用水位测针控制,水深采用毫米刻度尺记录。

2 结果与分析

2.1 环形隔墩堰流态与泄流能力

试验采用6个隔墩分隔的环形隔墩堰结构,不同泄量下水舌流态(图2)具有明显分段特征:

- a. 当泄量较小(12 m³/s)时(图2(a)),水舌细弱,沿隔墩间空隙自由下泄,未发生碰撞。各股水舌间隔明显,呈自由跌落流态,井内通气顺畅。
- b. 当泄量增大至39 m³/s时(图2(b)),水舌厚度增大,6股水舌在竖井中轴线较低位置碰撞,并于碰撞点上方形成小体积翻滚水体,相邻水舌之间在隔墩后形成三角形空腔区,使得竖井内部与外部大气充分连通。
- c. 当泄量进一步增大至82 m³/s(图2(c))与125 m³/s(图2(d)),水舌动能进一步增强,碰撞点上移,翻滚水体体积增大。隔墩后空腔面积减小,但仍然保持竖井内外部的连通。隔墩后空腔一方面保证竖井内部充分通气,另一方面平衡竖井内外的压力差,避免竖井内部不利水气回爆现象和压力不稳定现象发生。

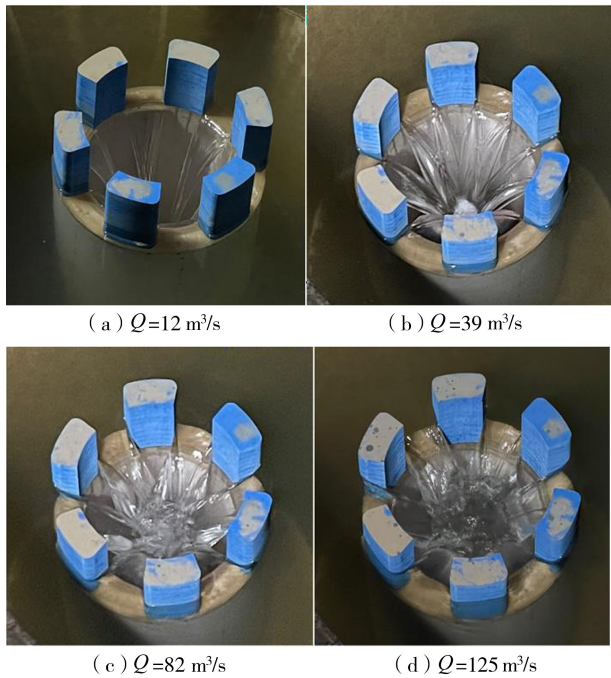


图2 环形隔墩堰堰流典型流态

综上,随着泄量增大,水舌呈现出“分离跌落”“集中碰撞”“强翻滚紊动”等典型流态。隔墩结构在分股导流与通气调压方面表现出显著优势,有效提升了竖井系统的水力稳定性与运行安全性。

水头 H 和泄量 Q 以及综合流量系数 m 的关系如表2所示,其中综合流量系数 m 由下式得到:

$$m = Q/nb\sqrt{2gH^{1.5}} \tag{1}$$

式中: n 为泄流孔数; b 为孔口宽度; g 为重力加速度。

表2 环形隔墩堰泄流能力

H/m	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$		m		超泄比/%
	试验值	设计值	试验值	设计值	
2.7	125.34	111.26	0.466	0.414	13
2.4	102.98	92.98	0.457	0.413	11
2.1	82.39	75.90	0.447	0.412	9
1.3	38.50	36.70	0.429	0.409	5
0.7	14.21	13.82	0.418	0.407	3

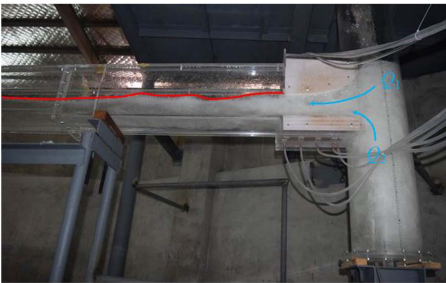
表2数据表明,泄量随水头增加而增大,表现出良好的堰流特性。不同水头时,泄量的试验值均大于设计值,超泄比为3%~13%,表明环形堰具备一定的超泄能力。推测其超泄原因为:一般设计值是偏于保守的,综合流量系数取值偏小,因此模型试验的试验值一般是大于设计值的,这对于工程泄流能力而言具有一定的安全保障。此外,环形隔墩堰进流孔是收缩的,而设计值计算公式一般是基于等宽明渠导出的,收缩进流对于泄流能力超泄应该是合理的。从综合流量系数看,其随水头增大而上升,这种堰型综合流量系数为0.40~0.47,其泄流能力介于宽顶堰与实用堰之间。

2.2 消能井与压坡段水力特性分析

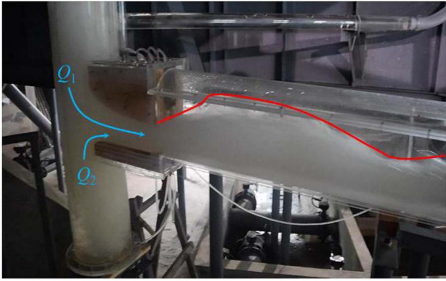
为消减竖井下落的水流能量和平稳过渡水流,在竖井底部分别设置了消能井和退水洞压坡段,实现竖井水流集中消能和水流90°大角度转向过渡。消能井设置于竖井底部,其设计体型为横截面直径为5 m的圆形,深度为11 m,并与退水洞通过压坡段连接,压坡段长度6 m,顶面采用椭圆曲线,底部倒角处理(图1)。

消能井和退水洞设计方案水流流态如图3所示,当泄量为39 m³/s时(图3(a)),消能井内水体紊乱,掺气显著,水体呈乳白色,压坡段为有压流态,水体表面与结构上表面间歇性接触,随着水体向下游移动,水体中气泡逐渐溢出,水流表面波动相对平稳,未见不利流态。当泄量增大至82 m³/s时(图3(b)),消能井内水体紊动剧烈,掺气充分,井内水位增高,压坡段对出流约束力增强,出流流速增大,但水流表面阵发性触发形成冲击现象,水面隆起并冲击洞顶。因此,消能井和退水洞压坡段整体呈现强掺混、强紊动、强掺气状态,随着泄量增大,退水洞压坡段水流出流不稳,存在间歇性冲击现象。

究其原因,初步分析认为主要存在以下几个因素的影响:①流态观测发现退水洞压坡段进流主要



(a) $Q=39\text{ m}^3/\text{s}$



(b) $Q=82\text{ m}^3/\text{s}$

图3 消能井和退水洞设计方案水流流态

来自上部进流(Q_1)和下部进流(Q_2),而上部进流明显大于下部进流,尤其随着泄量增大更加显著,这导致压坡段形成上下两股水流,并在两股水流之间存在边界层,由于两股水流流速略有差异(大泄量时上部流速大),形成不稳定的边界层,并于压坡段末端压力突变处释放气体;②水流掺气后可压缩性增强,容易引起有压流动的不稳定,且掺气浓度在水体中分布不均,在冲击射流不稳定的脉动压力作用下于压坡段末端突然释放气体;③压坡段长度不足,水流流态和受力尚未完成平顺转变。

针对上述现象,尝试在设计方案(D0)基础上优化退水洞进口结构和压坡段长度,拟定了4个优化方案(表3),并在典型设计工况(工况Z2, $Q=103\text{ m}^3/\text{s}$)条件下进行了对比试验,结果见图4。

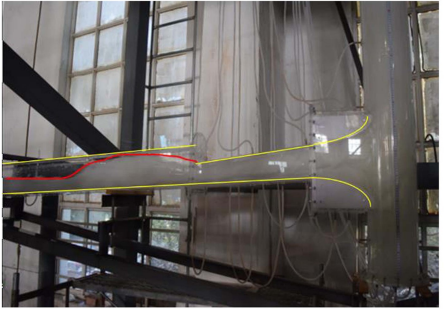
表3 优化体型参数

方案编号	消能井			压坡段		
	形状	D/m	H/m	进口	L/m	S/m^2
D0	圆柱型	5.0	11.0	设计方案	6.0	3.5×2.0
D1	圆柱型	5.0	11.0	优化方案	20.6	3.5×2.0
D2	圆柱型	5.0	11.0	优化方案	28.1	3.5×2.0
D3	圆柱型	5.0	11.0	优化方案	35.6	3.5×2.0
D4	马蹄型	7.0、5.0	12.0	优化方案	28.1	3.5×2.0

注: D 为消能井直径; L 为压坡段长度; S 为过流面积;马蹄型消能井两个直径数据分别为长轴和短轴直径。

a. 方案D1 压坡段进口上下边界均采用优化的1/4椭圆,压坡段长度延长至20.6 m,退水洞下部进流增大且流线更加平顺,但压坡段出口处仍然间歇性出现冲击现象(图4(a))。

b. 方案D2 在方案D1的基础上进一步延长压坡长度至28.1 m,冲击现象并未明显消除,但强度有所减弱(图4(b))。



(a) 方案D1



(b) 方案D2



(c) 方案D3



(d) 方案D4

图4 消能井与压坡段优化方案水流流态($Q=103\text{ m}^3/\text{s}$)

c. 方案D3 在方案D2的基础上进一步延长压坡长度至35.6 m,此时冲击现象基本消除,退水洞出流水面相对平稳(图4(c))。

d. 观测认为消能井上部进流和下部进流在退水洞进口处受阻并不断受到竖井下落射流的脉动冲击,使得两股水流交界面的波动较大,因此尝试改变消能井底部体型,消能井横截面由圆形改为向下游突出的马蹄型,井深由11 m增加至12 m(图1),同时方案D4保持与方案D2相同的压坡段长度。此时,退水洞进流流态更加平稳,且未见不利的冲击现象(图4(d))。

综上所述,充分长的压坡段可以使得水流平稳过渡衔接,消除不利冲击现象。此外,消能井横截面采用马蹄型断面更有利于消能井内水流大尺度掺混和退水洞平稳进流,可抑制不利冲击现象的发生。这也一定程度上验证了上文分析的冲击现象形成原因的合理性。因此最终将方案 D4 作为工程设计的推荐方案。

2.3 竖井系统水流消能效果分析

针对竖井系统进行消能效果分析,分别选取库区、退水洞压坡段出口处断面为计算断面,基于伯努利能量守恒方程,可得到消能率的计算表达式(式(2))^[5],典型水流条件下竖井系统消能率计算结果见表 4。

$$\eta = 1 - (h + v^2/2g)/(H' + h) \tag{2}$$

式中: η 为竖井系统消能率; h 为竖井退水洞压坡段出口水深,m; v 为压坡段出口的平均流速,m/s; H' 为上游水位与竖井压坡段出口的水位差,m。

表 4 竖井系统消能率计算结果

工况	$Q/(m^3/s)$	h/m	$v/(m/s)$	H'/m	$\eta/\%$
Z1	125	2.00	17.86	84.93	88.3
Z2	103	2.00	14.71	84.63	91.8
Z3	82	2.00	11.71	84.33	92.7
Z4	39	2.00	5.57	83.53	93.0
Z5	12	0.80	4.29	84.13	93.5

表 4 清晰展示了 5 个不同工况下竖井泄洪洞系统的泄量与消能率变化趋势,随着设计泄量由 125 m³/s 减小至 12 m³/s,系统消能率从 88.3% 提升至 93.5%,整体呈现出“泄量越小、能量耗散越充分”的规律。随着泄量增大,消能井单位水体消能功率增大,消能负荷增大,整体消能率降低,但该竖井系统结构在高低泄量工况下均具备良好的消能效果,尤其在小泄量条件下表现出更高的消能率和水力稳定性能,对水流条件具有良好的适应性与安全储备。

从水力机理角度,竖井系统的能量耗散过程可分为进口控制、竖井跌落和消能退水 3 个主要阶段,且主要集中在竖井跌落和消能退水阶段。

a. 进口控制阶段,堰口将水流分股导入竖井,水舌碰撞形成翻滚区,初步削减水头能量和控制竖井跌落水流流态。

b. 竖井跌落阶段,水流自由落体式下泄,势能转化为动能,并通过水舌相互作用、井内扩散与碰撞、气水掺混与逆压顶托等作用,实现主要能耗和水流流态转变。

c. 消能退水阶段,跌落水流与消能井内水体高强度冲击,消能井水体掺混紊动剧烈,通过压坡段转

为附壁流,流速和紊动强度逐步衰减。
最后,经压坡段调整后的水流通过泄槽进入消力池,再次集中消能后进入下游天然河道,实现整个泄水系统的分段消能、逐级削减的目的。因此,本竖井泄洪洞系统本质上是多级流态演变与能量耗散的复合型水力消能系统。

3 结 论

a. 典型水流条件下(堰顶水头 0.7~2.7 m),环形隔墩堰综合流量系数为 0.40~0.47。

b. 溢流堰设置中心对称的分流墩,能显著降低竖井壁面高速水流引起的空化空蚀风险,同时保证竖井与外部大气充分连通,有利于增强竖井水流掺气补气能力,避免水气回爆等不利现象。

c. 消能井作为竖井系统的主要消能区,采用马蹄型断面可进一步改善消能流态,提升水流过渡的稳定性。

d. 退水洞压坡段在较大泄量时在出口处容易产生阵发性冲击现象,这种不利流态主要由水体脉动、掺气及结构转折等因素所致;优化压坡段进流曲线并延长压坡长度,可有效减弱出流冲击现象。

e. 各工况下竖井系统消能率均超过 88%,且消能率随着泄量减小而升高。

参考文献:

[1] 潘定才,章鹏. 南方电网抽水蓄能电站泄洪建筑物优化设计研究[J]. 水利水电快报,2019,40(11):34-38. (PAN Dingcai,ZHANG Peng. Optimization design of flood discharge structures in pumped storage hydropower stations of China Southern Power Grid[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2019,40(11):34-38. (in Chinese))

[2] 张春晋,孙西欢,李永业. 龙抬头式泄洪洞安全监测指标分析[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(11):1112-1119. (ZHANG Chunjin,SUN Xihuan,LI Yongye. Analysis of safety monitoring indicators of dragon-head spillway tunnel[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2022,40(11):1112-1119. (in Chinese))

[3] 郭雷,张宗孝,马斌,等. 竖井溢洪道水力特性试验研究[J]. 人民长江,2007,38(6):110-112. (GUO Lei,ZHANG Zongxiao,MA Bin,et al. Experimental study on hydraulic characteristics of shaft spillways[J]. Yangtze River,2007,38(6):110-112. (in Chinese))

[4] 黄家姝,刘华,薛玉林,等. 龙抬头式竖井溢洪洞水力特性研究[J]. 中国农村水利水电,2025(3):95-100. (HUANG Jiashu,LIU Hua,XUE Yulin,et al. Study on hydraulic characteristics of longhead shaft spillway[J].

- China Rural Water and Hydropower, 2025 (3): 95-100. (in Chinese))
- [5] 李贵吉, 张建民, 许唯临, 等. 高水头水电站“三洞合一”布置的体型优化试验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(5): 54-60. (LI Guiji, ZHANG Jianmin, XU Weilin, et al. Experimental study on shape optimization of three-in-one diversion tunnel in high-head hydropower station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 54-60. (in Chinese))
- [6] 芦三强, 乔时雨. 跌流竖井结构优化及其气压特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 24-29. (LU Sanqiang, QIAO Shiyu. Structure optimization and numerical simulation of air pressure characteristics of a plunging flow dropshaft [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 24-29. (in Chinese))
- [7] ZHANG Shuangqing, LIU Jiachun, HUANG Biao, et al. Numerical study of geyser events in rainstorm systems at different scales [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(4): 381-389.
- [8] LIANG Peide, CHEN Jun, WU Teng, et al. Hydraulic characteristics of a large rotation-angle baffle-drop shaft through synergetic discharge from dry and wet sides[J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(1): 115-124.
- [9] 蔡付林, 郭黎明, 周骏, 等. 扩散段体型对竖井式进/出水口出流水力特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 100-106. (CAI Fulin, GUO Liming, ZHOU Jun, et al. Effect of diffuser geometry on hydraulic characteristics of flow at shaft-type inlet/outlet [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(5): 100-106. (in Chinese))
- [10] 程伟平, 章军军, 陈益民, 等. 超短竖井式进/出水口的水力控制[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(5): 548-552. (CHENG Weiping, ZHANG Junjun, CHEN Yimin, et al. Hydraulic control of super short vertical well entry/draft tub [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(5): 548-552. (in Chinese))
- [11] 董兴林, 杨开林, 郭新蕾, 等. 旋流喇叭形竖井泄洪洞水力学机理及应用[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 14-18. (DONG Xinglin, YANG Kailin, GUO Xinlei, et al. Hydraulic mechanism and application of swirling device in morning glory shaft spillway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 14-18. (in Chinese))
- [12] 法尔维 H T. 水工建筑物中的掺气水流[M]. 王显焕, 译. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [13] 孙高升. 大石门水电站脱壁流竖井式溢洪道设计及应用[J]. 人民黄河, 2014(10): 97-99. (SUN Gaosheng. Design and application of the shaft spillway with ring overflow weir in Dashimen Hydropower Station [J]. Yellow River, 2014(10): 97-99. (in Chinese))
- [14] 解卫东, 李晓丽, 孙双科. 大石门水电站竖井式溢洪道水力特性试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(4): 175-179. (XIE Weidong, LI Xiaoli, SUN Shuangke. Experimental study on shaft spillway hydraulic characteristics of Dashimen Hydropower [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 175-179. (in Chinese))
- [15] 牛争鸣, 洪镛, 谢小平, 等. 导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞的研究和实践: 以公伯峡水电站为例[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(1): 36-41. (NIU Zhengming, HONG Di, XIE Xiaoping, et al. Research and practice about reconstruction of diversion tunnel into permanent rotary internal energy dissipation tunnel: a case study on Gongboxia Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(1): 36-41. (in Chinese))
- [16] 雷显阳, 周辉, 赵琳. 环形薄壁堰堰首竖井水力特性研究: 以安徽绩溪抽水蓄能电站竖井溢洪道工程为例[J]. 人民长江, 2013, 44(23): 79-81. (LEI Xianyang, ZHOU Hui, ZHAO Lin. Study on hydraulic characteristics of vertical shaft with annular thin-wall weir: case study of vertical-shaft spillway of Jixi Pumped-Storage Power Station [J]. Yangtze River, 2013, 44(23): 79-81. (in Chinese))
- [17] 张文远, 张东, 杨帆, 等. 吉音水利枢纽竖井旋流泄洪洞水力特性试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(11): 130-133. (ZHANG Wenyuan, ZHANG Dong, YANG Fan, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of vortex spillway tunnel in Jiyin Water Control Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(11): 130-133. (in Chinese))
- [18] 梁迟. 竖井溢洪洞进口段水工模型试验[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(6): 49-50. (LIANG Chi. Hydraulic model test of the inlet section of the shaft spillway tunnel [J]. Water Conservancy Science and Economy, 2016, 22(6): 49-50. (in Chinese))
- [19] KEIHANPOUR M, KABIRI-SAMANI A. Effects of modern marguerite-shaped inlets on hydraulic characteristics of swirling flow in shaft spillways [J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(3): 246-256.
- [20] 李彬, 杨淇淇, 陆丹玫. 贵港抽水蓄能电站下水库泄洪建筑物设计[J]. 红水河, 2024, 43(6): 91-94. (LI Bin, YANG Qiqi, LU Danmei. Design of flood releasing structures of lower reservoir of Guigang Pumped Storage Power Station [J]. Hongshui River, 2024, 43(6): 91-94. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-05-28 编辑: 熊水斌)