

深孔泄洪洞体型的试验对比研究

韩守都¹, 张东²

(1. 新疆水利水电勘测设计研究院, 乌鲁木齐 830000; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 高速水流的水力特性是泄水建筑物体型选择需要关注的重要问题。某水电站深孔泄洪洞由导流洞改建而成, 在体型设计过程中设计了竖井旋流型和“龙抬头”型两种布置方式。经水工模型试验比较分析, 发现“龙抬头”型的泄洪洞不仅体型结构简单, 工程投资省, 而且具有水流流态稳定, 泄流能力大的特点。高速水流容易引起空化空蚀的问题可以通过优化体型和掺气减蚀措施解决。经综合比较, 该水电站最终采用了“龙抬头”型泄洪洞的改建方案。

关键词: 旋流竖井; 龙抬头; 掺气设施; 掺气水流

中图分类号: TV 615.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0209-05

Comparison Research on Experiment of Deep Discharge Tunnel Body

HAN Shou du¹, ZHANG Dong²

(1. Xinjiang Survey and Design Institute for Water Resources & Hydropower, Urumqi 830000, China

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The hydraulic characteristic of high speed flow is a key issue in selection of discharge structures. The deep discharge tunnel of a hydropower station was reconstructed from an existing diversion tunnel. In the design process, two schemes were considered: the vortex shaft discharge tunnel and the ogee discharge tunnel. Through the comparison and analysis of hydraulic model tests, the ogee discharge tunnel showed many advantages, including simple structures, investment saving, stable flow, and high discharge capacity. The cavitation erosion problems caused by the high speed water flow can be solved using the measures of shape optimization and aeration facilities. After the comprehensive comparison of the two schemes, the ogee discharge tunnel was adopted.

Key words: vortex shaft; ogee discharge tunnel; aeration facilities; aeration water flow

深孔泄洪洞与导流洞结合将施工期的临时导流洞改造成为永久泄洪建筑物, 可以简化枢纽布置, 减小工程量, 节省工程投资。导流洞改建为永久泄洪洞的布置型式多种多样, 包括常规的“龙抬头”型泄洪洞^[1,2]、竖井旋流型泄洪洞^[3,4]、水平旋流型泄洪洞^[5,6]、孔板泄洪洞^[7,8]。由于不同的布置型式具有不同的水力特性, 根据水电工程的具体条件合理地选择导流洞改建为永久泄洪洞的布置型式对工程的安全运行十分重要, 也是永久泄洪洞与导流洞结合时必须首先解决的关键问题。

某水电站主要任务是发电, 正常蓄水位 752.00 m, 总库容 2.32 亿 m³, 装机 160 MW, 属大(2)型 0 等工程。电站枢纽由拦河大坝、表孔溢洪洞、深孔泄洪洞、发电洞及电站厂房等主要建筑物组成。拦河大坝设计洪水标准为 100 年一遇, 设计洪水位 752.00 m; 校核洪水标 2000 年一遇, 校核洪水位 754.71 m。深孔泄洪洞与导流洞结合布置在枢纽左岸外侧,

进口底板高程为 690.00 m, 设计泄量 588.32 m³/s, 校核泄量 601.32 m³/s, 最大水头落差 121 m。导流洞总长 996.6 m, 洞身断面为 6 m × 8 m (宽 × 高) 城门洞型, 底板纵坡为 1/298 和 1/252 两段。

本文依托 1:30 的正态水工模型试验, 从泄流能力、水流流态、压力分布、掺气减蚀等方面对深孔泄洪洞采取竖井旋流式和“龙抬头”式两种型式进行分析比较, 探讨两种型式的设计及优化措施, 提出经济可行的方案和体型。

1 旋流竖井式泄洪洞试验分析

1.1 旋流竖井式泄洪洞体型简介

旋流竖井式泄洪洞由短压力进水口、引水道、旋流涡室、竖井段、退水洞、出口明渠及挑坎组成, 结构体型如图 1 所示。短压力进口的底板高程 690.00 m, 进水塔内布设平板事故检修门与弧形工作门。引水道长约 50 m, 首部设高度 0.8 m 的

掺气跌坎,引水道末端右边墙设椭圆曲面与涡室切向连接。涡室高度 20 m,内设圆弧形导流坎,圆弧半径 3.9 m,圆心角 95°;渐缩段高度 12.5 m,竖井直径 8.0 m、高度 36.3 m,底部水垫池深 9.0 m;退水洞(原导流洞)长 609 m,底坡为 1/252,断

面为 6 m × 8 m 的城门洞型,首部设长 10.0 m 的压坡段,断面高度由 6.4 m 渐缩到 4.7 m,用于控制退水洞内的水流流态。退水洞后接矩形明渠,明渠宽 6.0 m,边墙高度 7.0 m,出口底板高程为 634.00 m,以挑流消能方式与下游河道衔接。

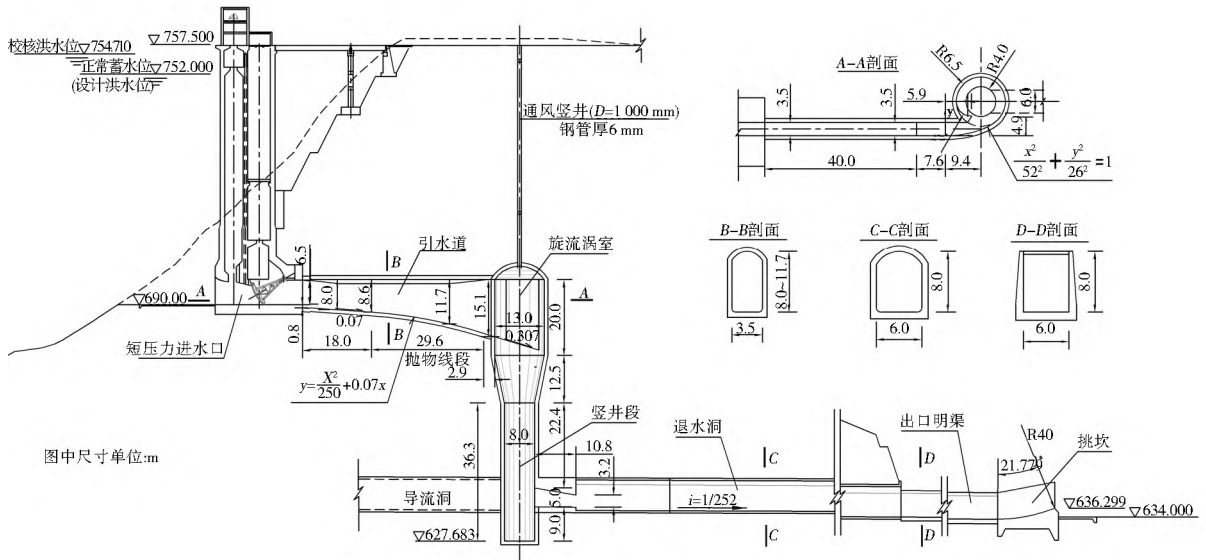


图 1 竖井旋流式泄洪洞

Fig. 1 The vortex-flow shaft spillway tunnel

1.2 泄流能力

旋流竖井式泄洪洞短压力进水口后的引水道按照明流隧洞设计,在引水道维持明流状态的条件下,泄流流量由式(1)计算:

$$Q = \mu B a \sqrt{2g(H - a)} \quad (1)$$

式中: Q 为泄流流量 (m^3/s); B 为弧门控制断面的孔口宽度 (m); a 为孔口高度 (m); H 为进水口底板以上的作用水头 (m); μ 为流量系数,由试验资料得到库水位高于 745.00 m 时其值可取 0.86。

弧门控制断面孔口尺寸 4 m × 5 m (宽 × 高),校核水位 754.71 m 时泄洪洞下泄流量为 589 m^3/s 。模型试验过程中当库水位超过 734.00 m 时,退水洞内呈明满流交替状态,出口明渠段水流漫溢。对试验资料分析发现水流经竖井旋流消能后进入退水洞的最大流速约 22 m/s,流速降低使得退水洞内的水深增大。按照退水洞(原导流洞)的底坡、断面尺寸,在表面糙率 0.015,断面水深不超过 6.5 m 的条件下,最大流量不宜大于 470 m^3/s ,否则退水洞内难于维持稳定的明流流态。为了适应退水洞的泄流能力,弧门孔口尺寸调整为 3.5 m × 4.5 m,相应于校核水位的下泄流量为 468 m^3/s 。可见,旋流竖井式泄洪洞可以大大降低了退水洞内的水流流速,有利于防止高速水流引起的空蚀破坏,但同时限制了泄洪洞的泄流能力。

1.3 水流流态

在旋流竖井式泄洪洞最大流量已知的情况下,涡室直径、竖井直径按照经验公式(2)、(3)估算:

$$D_{\text{涡}} = \frac{5}{3} D_{\text{井}} \quad (2)$$

$$D_{\text{井}} = k(Q^2/g)^{0.2} \quad (3)$$

式中: $D_{\text{涡}}$ 为涡室直径 (m); $D_{\text{井}}$ 为竖井直径 (m); Q 为流量

(m^3/s); k 为经验系数, $k = Fr^{0.1}$ 。当最大流量为 470 m^3/s 时,竖井直径取 8.0 m,涡室直径取 13.0 m,涡室直径与竖井直径的比值为 1.625。

涡室直径和竖井直径初步确定后,引水道的坡度对流态影响较大。当引水道底坡 $i = 0.07$ 、库水位达 742.50 m 时,界面水跃的水气混合物偶然充满涡室进口,整个引水道仍呈明流流态,水跃跃头推移至涡室进口上游约 14.0 m 处;在库水位高于 750.00 m 时,引水道呈明满流交替流态,竖井底部水垫水气掺混均匀,环状水跃位置稳定。当引水道底板改用抛物曲面后末端底坡 i 调整为 0.31,校核水位 754.34 m,闸门全开泄流工况下,引水道仍然可以维持稳定明流状态,涡室进口前局部壅水。竖井涡室中心的通气空腔联通良好,能够形成稳定螺旋流流态。竖井底部水垫池内水流旋转强烈,但水气掺混不均匀,边壁四周近似清水水体。退水洞内呈明流流态,水面有波动,波动幅度约 1.0 m。

从试验结果来看,涡室进口流速高,旋转水流的离心作用对涡室进口形成阻塞,从而影响引水道的水流流态及泄洪洞的泄流能力。当加大引水道坡度,适当增大涡室进口水流的竖向分流速,减小涡室水流的旋转强度,可以有效改善引水道内的水流流态。

1.4 动水压力特性

试验实测不同水位、闸门全开泄流条件下,涡室及竖井段的压力分布如图 2 所示。可以看出,引水道边墙压力在椭圆曲线段迅速增大,并在椭圆曲线和涡室圆弧相交点附近达到极值,进入涡室后,边壁压力稍有减小。在库水位 754.6 m、752.00 m、740.50 m 和 730.00 m 时,竖井段实测最大时均压力值分别为: 372.1 kPa (PS8)、348.7 kPa (PS8)、302.5 kPa (PS9) 和 276.9 kPa (PS9)。由于竖井段内水流的强烈旋转作用一直延续至竖井底部,因此退水洞的进口两侧边墙的左边

压力大于右边压力,例如以上四种泄流条件下,实测两侧最大压差依次分别为 65.1 kPa、75.5 kPa、94.0 kPa 和 94.5 kPa。

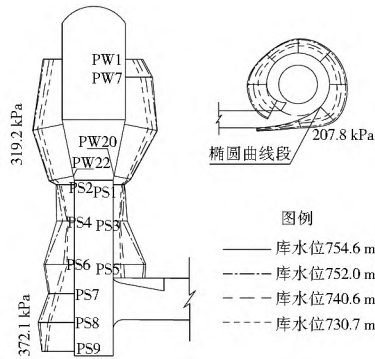


图2 涡室及竖井段竖向压力分布

Fig. 2 Vertical distribution of pressure in the volute chamber and shaft

退水洞段(原导流洞段)底板压力变化平缓,且沿程呈缓慢增加的趋势。高速水流进入涡室后在水流惯性和重力作

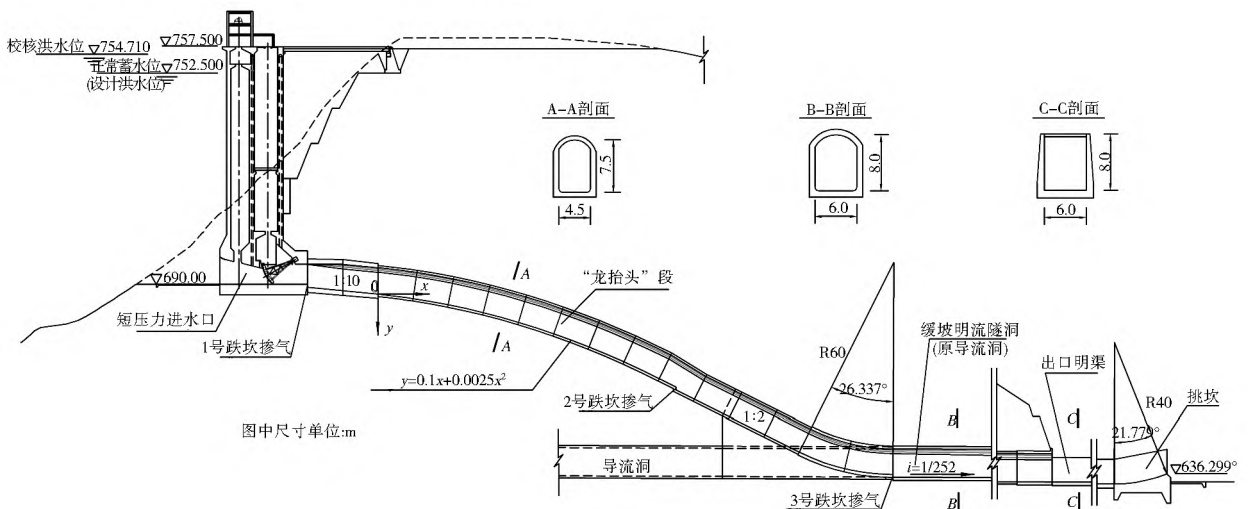


图3 “龙抬头”型泄洪洞体型

Fig. 3 The body type of ogee discharge tunnel

2.2 泄流能力

“龙抬头”式泄洪洞的进水口段下游为高速明流隧洞,泄流能力由短压力进水口控制,闸门全开的下泄流量按公式(1)表示。根据试验资料整理得到在库水位高于590 m的情况下,泄洪洞的流量系数已趋于稳定,其值为0.855,相应于校核水位754.71 m的下泄流量为595 m³/s,基本满足下泄流量601.32 m³/s要求。

2.3 水流流态

试验显示,各种运行条件下泄洪洞内水流流态平稳顺畅,无水翅及水股窜顶等恶劣流态,水面水滴飞溅现象轻微,整体水流流态稳定;第一、二道掺气跌坎后的空腔形态稳定,空腔内无回水,底部水流掺气效果良好;第三道掺气设施底空腔和侧空腔形态稳定,底空腔内基本没有积水现象,侧空腔后无明显水翅,水流掺气充分。

2.4 压力分布

进水口和“龙抬头”段在闸门全开、设计水位及校核水位泄流时的沿程压力分布如图4所示,在闸门全开设计水位752.00 m泄流条件下,实测顶板最大压强463.2 kPa,三道

用下形成贴壁螺旋流动,旋流中心的稳定空腔与大气连通,涡室及竖井边壁上的动水压力主要来源于水流离心力的作用。涡室竖井等高流速部位在不同泄洪条件下均未出现负压,只要严格控制涡室竖井段的体型结构和施工不平整度,就不至于产生空化水流。

2 “龙抬头”式泄洪洞试验成果分析

2.1 “龙抬头”式泄洪洞体型简介

“龙抬头”型泄洪洞由短压力进水口、“龙抬头”段、缓坡明流隧洞(原导流洞)、出口明渠及挑坎组成,结构体型如图3所示。短压力进水口底板高程690.00 m。弧形工作闸门,孔口尺寸为4.5 m×4.5 m。“龙抬头”段长166.397 m,渥奇曲线方程为 $y = 0.1x + 0.0025x^2$,断面型式为4.5 m×7.5 m的城门洞型断面,渥奇曲线下部直线段陡坡坡度1:2,反弧连接段半径60.0 m,圆心角26.337°。在“龙抬头”段沿线共设3道掺气设施,第三道掺气设施后与原导流洞连接。

掺气坎后的空腔负压依次分别为-0.18 kPa、-9.86 kPa和-3.89 kPa,最大时均冲击压力依次位82.09 kPa、85.77 kPa和66.55 kPa(PC31),抛物线段最小压力13.65 kPa,反弧段最大压力143.65 kPa。进水口顶板压力沿程逐渐减低,压力变化比较平缓;“龙抬头”段压力分布特点是空腔后水舌跌落区压力迅速增大,呈水流冲击特征,冲击区后压力逐渐降低;受水流离心力的影响,抛物线段压力较小,反弧段压力明显增大,整个过流面除掺气空腔外没有出现负压。

2.5 掺气减蚀措施及出口消能

为了防止泄洪洞因高速水流引发空蚀破坏,在改建的“龙抬头”段布置了三道掺气设施,桩号依次为0+000 m、0+104.700 m、0+166.394 m。第一道掺气坎处的最大流速约30 m/s,采用底部挑跌坎组合型式;坎后两侧边墙的局部掺气盲区则通过控制表面不平整度避免空化水流。

泄洪洞的反弧连接段最高流速达45 m/s,且水流方向连续变化,受水流离心力作用压力梯度大,水力特性复杂,是容易发生空蚀破坏的关键部位。因此,在反弧上游的陡槽段设置第二道掺气设施,加强对反弧段的掺气减蚀保护。在反弧

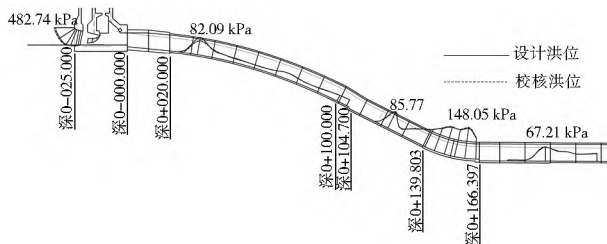


图 4 “龙抬头”段压力分布

Fig. 4 Distribution of pressure in the ogee discharge tunnel

末端泄洪洞宽度由 4.5 m 增加至 6.0 m, 采用常规突扩突跌掺气设施, 坎后底空腔内的积水深度与坎高相近, 水流通气不畅, 侧空腔尾部形成水翅, 严重影响侧面水流通气效果。经优化后采用侧面为三角形的异型掺气坎使上部水流先于下部水流出坎扩散与边墙交汇, 不仅可以有效抑制水翅, 改善下游水流流态, 而且避免了侧空腔内气流沿水翅串入水面, 增强了侧面水流的挟气能力。三道掺气设施的体型如图 5 所示, 掺气设施的空腔形态稳定, 通气顺畅, 不同特征水位下实测三道掺气设施的底空腔长度和通气井内的平均风速见表 1, 可以看出第一道和第二道掺气设施的平均通气风速为 19.7 ~ 23.3 m/s, 总通气量为 85.8 ~ 98.2 m³/s, 相应的气水比为 14.3% ~ 16.0%, 说明两道掺气设施的水流通气效果良好; 第三道掺气设施采用三维异型掺气坎, 侧空腔与底空腔及洞顶余幅相互贯通, 侧空腔成为向底空腔供气的通道, 具有通气井的功能。虽然通气井内的风速偏小, 但不会影响水流的掺气效果, 实测第三道掺气设施下游模型中的底部水流最小掺气浓度为 1.2%。

由于缩尺效应影响, 模型试验的通气风速和水流掺气浓度不能客观地反映原型结果, 但原型中的通气风速和掺气浓度一般大于模型试验值^[9], 且实践表明原型中底部水流掺气浓度达到 1% 时即可对过流面起到掺气减蚀保护作用。

表 1 空腔长度与通气的风速

Table 1 The length of cavity and velocity of ventilating

位置	项目	设计水位 752.00 m		校核水位 754.71 m	
		左	右	左	右
1号坎	空腔长度/m	19.2	20.4	22.8	23.1
	通气风速/(m·s ⁻¹)	19.7	20.0	21.9	21.9
2号坎	空腔长度/m	13.8	15.0	14.1	15.3
	通气风速/(m·s ⁻¹)	23.0	20.1	23.3	22.2
3号坎	空腔长度/m	21.9	21.9	21.0	21.0
	通气风速/(m·s ⁻¹)	15.3	14.8	15.9	14.8

泄洪洞出口下游河道开阔, 采用斜截式挑流鼻坎, 挑流水舌扩散比较充分, 消能防冲效果良好, 设计水位泄洪时下游冲坑最大深度约 7.0 m, 冲刷淤积堆丘对电站尾水影响不大。

3 讨论

对前文试验结果进行分析发现, 竖井旋流式泄洪洞和“龙抬头”型泄洪洞的水力特性有明显区别。

竖井旋流式泄洪洞: 作为一种洞内消能形式的泄水建筑物, 其消能效果良好, 可以避免高速水流引起的空化空蚀问

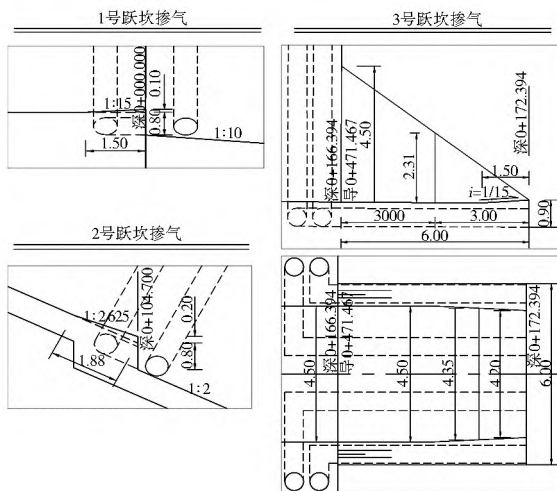


图 5 掺气设施体型

Fig. 5 The body type of aerator

题, 减轻了下游河道的消能负担, 特别是在出口下游河谷狭窄的地形条件下, 可以减轻泄洪消能雾化对边坡的影响。但对于该工程泄洪洞来说存在以下主要问题: (1) 进水口底板高程低, 设计水位时涡室进口处的水流流速达 35 m/s 以上, 旋转贴壁流难于掺气, 若出现施工凸体时可能引发空化空蚀; (2) 竖井高度不足, 底部水垫层水流流态偏流严重; (3) 原导流洞段的过流断面偏小, 流速减低后泄洪洞的泄流能力不能满足设计要求。

“龙抬头”式泄洪洞: 结构体型相对简单, 泄流能力能够满足设计要求且略有富裕。各种运行条件下水流流态稳定, 水流衔接顺畅, 而且可节省工程投资 436 万元。主要缺陷是反弧连接段流速高, 空化空蚀问题比较突出; 出口水流能量集中。模型试验表明通过合理布置掺气设施的位置和优化掺气设施型式, 能够对反弧连接段及高速过流面实施掺气减蚀保护, 泄洪洞出口地形比较开口, 优化出口挑坎可以妥善解决出口消能防冲问题。经综合比较最终推荐工程采用“龙抬头”式泄洪洞的改建方案。

参考文献(References):

[1] 陈椿庭. 大坝大流量泄洪建筑物[M]. 水利电力出版社, 1988. (CHEN Churting. High dam Large discharge Spillway Buildings[M]. Beijing: Water Conservancy & Power Press, 1988. (in Chinese))

[2] 马吉明. 有关龙抬头泄洪洞水力设计的几个问题[J]. 水利水电技术, 1995, (2): 16-19. (MA Jiming. Hydraulic Characteristics in the Design of Dragon Look up Tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1995(2): 16-19. (in Chinese))

[3] 董兴林, 高季章, 钟永江. 超临界流旋涡竖井溢洪道设计研究[J]. 水力发电, 1996, (1): 44-48. (DONG Xinglin, GAO Jizhang, ZONG Yongjiang. Design and Study on Supercritical Flow Vortex Shaft Spillway[J]. Water Power, 1996, (1): 44-48. (in Chinese))

[4] 郭焱, 倪汉根. 旋流式竖井溢洪道水力特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1995, 10(2): 146-154. (GUO Yan, NI Hangan. The Hydraulic Characteristics of Shaft Tunnel in Vortex Flow Intake Shaft Spillway[J]. Journal of Hydrodynamics.

- Ser. A, 1995, 10(2): 146-154. (in Chinese))
- [5] 洪滴. 公伯峡水电站右岸旋流泄洪洞的选型[J]. 水力发电, 2004, 30(8): 22-24. (HONG Di. Type Selection of Gyration flow Spillway Tunnel in the Right Bank of the Gongboxia Hydropower Station[J]. Water Power, 2004, 30(8): 22-24. (in Chinese))
- [6] 汪振, 牛争鸣, 李嘉. 水平旋流泄洪洞的综合水力特性[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(1): 14-19. (WANG Zhen, NIU Zhengming, LI Jia. Synthetical Hydraulic Characteristics of Level Rotary Discharge Tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(1): 14-19. (in Chinese))
- [7] 李忠义, 陈霞, 陈美法. 导流洞改建为孔板泄洪洞水力学问题研究[J]. 水利学报, 1997, (2): 1-7. (LI Zhongyi, CHEN Xia, CHEN Meifa. Study on Hydraulic Problems of Spillway Tunnels with Orifices Reformed from Diversion Tunnel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, (2): 1-7. (in Chinese))
- [8] 林秀山, 沈凤生. 小浪底水利枢纽孔板泄洪消能研究[J]. 水利水电技术, 2000, 30(1): 52-54. (LIN Xiushan, SHEN Fengming. Study on Multi-Orifices Energy Dissipation for Xiaolangdi [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, 30(1): 52-54. (in Chinese))
- [9] 时启燧. 高速水气两相流[M]. 中国水利电力出版社, 2007. (SHI Qisui. High Speed Water-air Two phase Flow[M]. Water Conservancy & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [10] 董兴林, 郭军, 肖白云. 高水头大流量旋流竖井式泄洪洞的设计研究[J]. 水利学报, 2000, (11): 27-31. (DONG Xinglin, GUO Jun, XIAO Baiyun. Design Principle of High Head and Large Discharge Vortex Drop Spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (11): 27-31. (in Chinese))

(上接第 147 页)

- [11] 宁黎元, 熊书宁. 数值模拟查明地下水系统隐伏边界位置及其性质方法探讨[J]. 贵州地质, 2012, 29(1): 48-51. (NING Liyuan, XIONG Shuning. Study on the Hidden Boundary Location and Its Property of Groundwater System By Numerical Simulation [J]. Guizhou Geology, 2012, 29(1): 48-51. (in Chinese))
- [12] Panagopoulos G. Application of MODFLOW for simulating groundwater flow in the Trifilia karst aquifer, Greece [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67: 1877-1889.
- [13] 吕晓俭, 李宇. 北京市通州区龙旺庄隐伏灰岩水源地勘查与评价研究[J]. 水文地质工程地质, 1999, (2): 17-21. (LV Xiaojian, LI Yu. Investigation and Evaluation Research of Long Wangzhuang Concealed Limestone Water Source in Tongzhou District Beijing [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, (2): 17-21. (in Chinese))
- [14] 赵起超, 王晓红. 北京市大兴县念坛水源地供水水文地质详查报告[R]. 1993. (ZHAO Qichao, WANG Xiaohong. Detailed Report on Water supply Hydrogeology in Niantan Water Source, Daxing, Beijing [R]. Hydrogeological and Engineering Geological Team of Beijing, 2001. (in Chinese))
- [15] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质, 2003, (5): 53. (ZHU Xiaobin. Groundwater Modeling System (GMS) Software [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, (5): 53. (in Chinese))
- [16] McDonald M G, Harbaugh A W. A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model [R]. Techniques of Water-Resources Investigations of USGS. Book 6, Chapter A1. 1988.
- [17] Harbaugh A W, MODFLOW-2005, The U S Geological Survey Modular Ground Water Model: The Ground Water Flow Process, the U S Geological Survey Techniques and Methods 6-A16 [R]. Reston, Virginia: the U S Geological Survey, 2005.
- [18] 薛禹群, 吴吉春. 地下水动力学(第三版) [M]. 北京: 地质出版社, 2010. (XUE Yiqun, WU Jichun. Groundwater Dynamics (third edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))