

箱形涵洞对河床水沙特性影响的试验研究

张鸿清¹, 胡明亮², 贺贝贝³, 楼益龙¹, 陆姗姗¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 深圳市东江水源工程管理处, 广东 深圳 518036;
3. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056021)

摘要: 以漳河的穿河涵洞为对象, 采用物理模型的方法, 就3年一遇和50年一遇洪水工况时箱形涵洞所在河道的沿程水位、上下游各断面流速及其下游河床局部冲淤变形等问题进行了试验观测, 探讨了箱形涵洞对河床水沙特性的影响。试验表明: 在3年一遇和50年一遇洪水工况下, 箱形涵洞对上游河床的壅水较少, 最大壅水高度分别为0.57 m和0.3 m; 涵洞上游各断面的平均流速较无涵洞时有所减小, 且断面横向流速分布曲线更平坦。在迎水面出现了河中心流速较左右岸流速大的现象; 在涵洞下游较远的CS8断面的平均流速分别为1.8 m/s和3.7 m/s, 与无涵洞时相差不大; 在3年一遇洪水工况下, 箱形涵洞后能形成 $Fr=4.52$ 的稳定水跃, 使得箱形涵洞下游CS6断面的河床局部冲刷较少, 其平均冲刷深度约为0.5 m。由此可见, 箱形涵洞具有较优的水力条件。

关键词: 箱形; 穿河涵洞; 水位; 壅水; 流速; 冲淤变形; 模型试验

中图分类号: TV131.61; TV149 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0097-04

Experimental Study on the Effects of Box-shaped Culvert on the Characteristics of Water and Sediment of Riverbed

ZHANG Hongqing¹, HU Mingliang², HE Beibe³, LOU Yilong¹, LU Shanshan¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Dongjiang Water Source Project Management Division of Shenzhen, Shenzhen 518036, China;

3. College of Hydraulics and Electric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

Abstract: A physical model based on the background of culvert crossing the Zhang River was used to investigate the impacts of box-shaped culvert on the characteristics of water and sediment of riverbed under the conditions of once in three year flood and once in fifty year flood. The water levels along the river, velocities on the cross sections in the upstream and downstream reaches of box-shaped culvert, and the local scouring in the downstream reach of box-shaped culvert were measured. The results showed that (1) under the conditions of once in three year flood and once in fifty year flood, there is a small amount of backwater in the upstream reach of box-shaped culvert, and the maximum heights of backwater are 0.57 m and 0.3 m, respectively; (2) the mean velocities at the cross sections in the upstream reach of box-shaped culvert are lower than those without the culvert, and the transverse velocity distribution becomes smoother with the existence of culvert; (3) the velocity in the central of river is higher than that at the left and right river banks in the upstream face; (4) the mean velocities at the cross section of CS8 downstream of the culvert are 1.8 m/s and 3.7 m/s, respectively, which are similar to those without the culvert; and (5) under the condition of once in three year flood, a stable hydraulic jump can form behind the culvert with a Froude number of 4.52, which results in low local scouring of riverbed at the cross section of CS6 downstream of the culvert with an average scour depth of 0.5 m. The conclusions suggested that the box-shaped culvert has good hydraulic conditions.

Key words: box-shaped; culvert crossing the river; water level; backwater; velocity; erosion and deposition deformation; model test

为了满足人们生产生活的需要, 在河道引水工程中常常修建穿河涵洞。穿河涵洞除了具有引水的功能外, 还可以作为节点^[1]发挥其缓冲调节上游来水, 控制下游河段主槽发展

方向的作用。位于漳河的穿漳涵洞就是一个典型的节点工程。通过穿漳涵洞的调节, 刘深屯—穿漳险工段的主要河段逐步稳定, 险工段也趋向脱险。然而, 穿漳涵洞在“96.8”洪

水中受到了严重毁坏,经过几次修复后,局部冲刷仍较严重,其稳定性受到影响^[2]。为了保证穿漳涵洞等节点工程的自身稳定性,进而发挥节点在河道的作用,有必要对其附近河床水沙特性进行研究。

目前,有关河道节点工程对其附近河床水沙特性的研究主要针对的是溢流坝^[3]、橡胶坝^[4]、滚水坝^[5]等,而关于穿河涵洞影响河床水沙特性的研究较少。张鸿清等^[6]就圆弧形和梯形穿河涵洞对河床冲淤变化的影响进行过试验研究,结果表明,在 3 年一遇和 50 年一遇洪水工况下,圆弧形涵洞周围河床变形较梯形涵洞都要小,因此对于常年来水与 3 年一遇洪水标准流量相差不大的漳河,选择圆弧形涵洞较好。但是,圆弧形涵洞下游河床的冲刷依旧较严重,同时其迎水面和背水面的曲面设计,在实际施工中较为复杂。为了保证穿河涵洞下游河床出现较小的冲刷,本文设计了一种箱形截面的穿河涵洞,并以穿漳涵洞所在河道为模型,利用物理模型的方法就箱形涵洞对河床水流特性及其下游河床局部冲淤变形的影响进行研究。

1 试验设计与验证

1.1 试验设计

模型的几何比尺为 1:100,长度范围为上起漳河右堤桩号 61+800,下迄桩号 63+800,总长约 2 km。试验模型的长度为 20 m(进水段和出水段各长 5 m,试验段长 10 m),宽度为 1.3 m。模型中主槽部分采用动床模型,而滩地以及大堤则采用定床模型。通过计算得出满足水流运动相似的流速、糙率、流量和时间比尺分别为:1:10、1:2.15、1:100000 和 1:10。为了分析涵洞对其所在河道的河床水沙特性影响,流速和泥沙冲淤测量断面分别布置在涵洞上下游。在原型河道中,涵洞上游 CS1 至 CS5 断面与迎水面的距离分别为 220 m、150 m、100 m、50 m 和 10 m。涵洞下游 CS6 至 CS9 断面与背水面的距离分别为 20 m、70 m、120 m 和 190 m。水位观测点 1 号-12 号布置在河床两岸,见图 1。



图 1 模型布置图

Fig. 1 Model layout

试验设计的箱形涵洞与原穿漳涵洞具有相同的过水能力,即达到涵洞双排布置的要求,并与文献[6]中的两种穿河涵洞具有相同的截面面积。设计的箱形涵洞模型见图 2。据文献[8],本试验中的涵洞顶部高程设计为 46 m,河道上下游河床的初始地形高程均设计为 44 m。箱形涵洞的截面尺寸、洞顶高程和上下游初始河床的高程,见图 2。

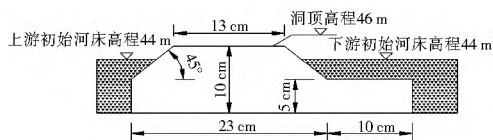


图 2 箱形涵洞截面与洞顶高程和初始河床高程

Fig. 2 The cross section of box shaped culvert and the elevations of the culvert roof and initial riverbed

模型根据动床河工模型相似律^[7]进行设计。试验选择的来水工况和模型沙均与文献[6]中的一样。来水工况为 3 年一遇和 50 年一遇洪水两种工况。其中,3 年一遇洪水时的主槽过水流量为 500 m³/s,50 年一遇洪水时的主槽过水流量为 2 069.73 m³/s。由于模型试验所在的平原河道中推移质输沙量占悬移质输沙量的比例很小,影响河床冲淤变化的主要是悬移质中的床沙质部分,因此模型试验中将沙质推移质放在床沙质中一并考虑。本试验选用的模型沙是重率为 1.17 t/m³的塑料沙。表 1 为满足悬移质与沙质推移质运动相似^[8,11]的比尺汇总表。

表 1 比尺汇总表

Table 1 Scale summary

沉速比尺	沙粒径比尺	起动流速比尺	干容重比尺	含沙量比尺	变形时间比尺
1:10	1:2.76	1:10	1:2.26	1:0.233	1:96.86

1.2 试验验证

本文选择在 3 年、50 年一遇洪水时原穿漳涵洞迎水面的水位来进行验证。根据原河道的水位资料,穿漳涵洞处河床在 3 年一遇和 50 年一遇洪水时的水位分别为 48.30 m 和 51.36 m。表 2 为原穿漳涵洞迎水面的 6 号和 7 号测针的水位验证结果。

由表 2 可知:在 3 年一遇和 50 年一遇洪水工况下,模型迎水面的水位与原型比较接近,水位的最大误差为 ±0.09 m,表明本文的试验模型能够较好的反映水流运动特征。

表 2 水位验证结果

Table 2 Verification results of water level

重现期	3 年一遇	50 年一遇
原型水位/m	48.30	51.36
模型换算成原型后的水位/m	6 号测针	48.32
	7 号测针	48.37
	平均	48.35
差值	0.05	0.05

2 试验结果与分析

2.1 水位沿程变化

当穿河涵洞节点在河道上形成过水坝时,其上游水流将成壅水状态。为了分析箱形涵洞上游壅水情况,本试验对建涵洞前后河床左右岸水位进行了观测。图 3 为 3 年一遇和 50 年一遇洪水工况下,有涵洞与无涵洞时河床左右岸沿程水位变化的对比曲线图。

在原型河道中,穿漳涵洞距试验段入口 490 m。由图 3 可知,在两种来水工况下,与无涵洞时相比,受涵洞壅水的影响,上游河床左右岸的水面线均有所抬高,且左岸水位均略高于右岸,水位抬高的最大值均位于距涵洞上游 60~110 m 之间的河床。试验表明,箱形涵洞上游壅水随着来水流量的增大而减小。在 3 年和 50 年一遇洪水工况下,箱形涵洞的最大壅水高度分别为 0.57 m 和 0.3 m;而文献[6]中圆弧形和梯形涵洞的最大壅水高度分别为 0.61 m 和 0.34 m、0.58 m 和 0.32 m。可见,箱形涵洞对其上游的壅水程度最小。对

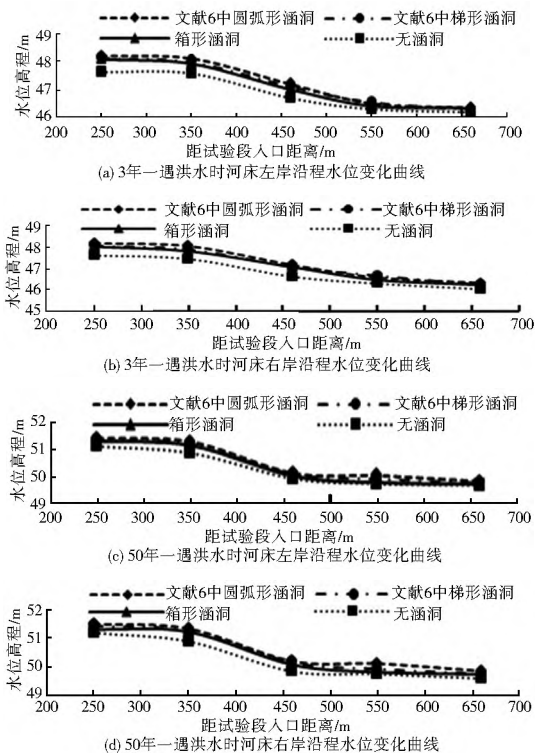


图3 河床水位变化曲线

Fig. 3 Water level variation curves of riverbed

其原因分析如下: 试验前, 上述三种涵洞具有相同的洞顶高程和上下游初始河床高程, 因圆弧形涵洞的迎水面为圆弧形, 阻水面积较其他两种涵洞的斜平面要大, 使得圆弧形涵洞上游壅水程度最大; 而箱形涵洞背水面的梯度较梯形涵洞的大, 使得水流下泄时流速较快, 位能较小, 所以箱形涵洞上游的壅水程度较梯形涵洞的要小。

2.2 涵洞上下游各断面横向流速分布及大小

当涵洞作为节点工程横穿于河床时, 因上游来水遇到不可动约束界面, 使得涵洞周围及其上下游一段范围内水流的流速大小和分布均受到影响。图4和图5为在3年一遇和50年一遇洪水工况下, 河道在建箱形涵洞前后CS2~CS8断面的横向流速分布曲线。

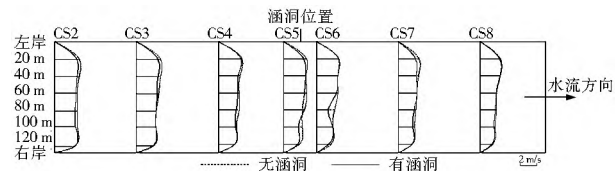


图4 3年一遇洪水工况时CS2~CS8断面横向流速分布

Fig. 4 Transverse velocity distributions at the cross sections of CS2- CS8 under the condition of once in three year flood

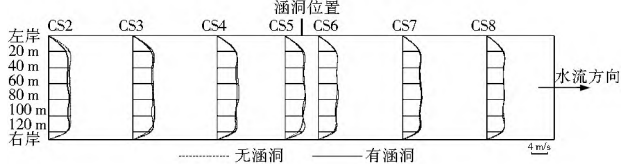


图5 50年一遇洪水工况时CS2~CS8断面横向流速分布

Fig. 5 Transverse velocity distributions at the cross sections of CS2- CS8 under the condition of once in fifty year flood

由图4和图5可知: 在3年一遇洪水工况下, 无涵洞时河道中CS2~CS8断面的流速从左岸到右岸均呈递减变化, 其中CS2~CS5断面左岸流速在2.52~3.03 m/s, 右岸流速在1.89~2.75 m/s; CS6~CS8断面左岸流速在2.05~2.63 m/s, 右岸流速在1.65~2.20 m/s; 而在50年一遇洪水工况下, 无涵洞时河道中CS2~CS8断面的最大流速则均出现在距左岸90 m附近的河床, 其中各断面流速均在4~4.9 m/s, 但右岸近区流速较小, 在3.54~4.22 m/s。

从图4中还可看出: 在3年一遇洪水工况下, 与无涵洞相比, 箱形涵洞上游CS2至CS4各断面的平均流速均有所减小, 且断面横向流速分布曲线变得平顺, 其中涵洞上游各断面左岸河床的流速变化不大, 流速在2.48~2.77 m/s之间, 而右岸河床的流速却逐渐减小, 由CS2断面的2.31~2.52 m/s减小到CS4断面的2.03~2.21 m/s; 到了CS5断面, 右岸流速又继续减小, 断面出现了河中心流速较左右岸流速大的现象, 该断面的最大流速位于距左岸60 m的河中心。另外, 在涵洞下游的CS6断面流速分布成M型, 该断面的平均流速为2.02 m/s。表明上游来水跃过涵洞后, 下游附近紊动增强, 局部出现漩涡, 使其背水面附近断面的水流流速分布不均匀。下游CS7和CS8断面的横向流速分布曲线则比较平坦, 流速均位于1.5~2.1 m/s间, CS8断面的平均流速为1.8 m/s, 与无涵洞时在该断面的平均流速较为接近。

由图5可知: 在50年一遇洪水工况下, 与无涵洞时相比, 箱形涵洞上游CS2~CS4断面的平均流速均有所减小, 且断面横向流速分布曲线变得平坦, 到了CS5断面, 由于水流流速较大, 上游河床被冲刷, 挟沙水流遇到涵洞时泥沙淤积于迎水面, 进而过水面积减小, 使得CS5断面各测点流速均有所增大; CS5断面的最大流速位于距左岸80 m的河中心, 即迎水面附近也出现了河中心流速较左右岸流速大的现象; 箱形涵洞上游CS2~CS5断面的横向流速分布曲线均位于4.31~4.39 m/s之间。而在涵洞下游的CS6断面流速较下游CS7和CS8断面的流速要大, 原因是当上游河床的水沙平衡后, 水流挟沙向下, 在涵洞背水面出现回淤现象, 进而过水面积减小, 使得背水面附近水流流速较下游的要大。其中, CS6和CS7断面的横向流速均位于3.8~4.3 m/s间, 而CS8断面上各测点的流速值较为一致, 断面平均流速约为3.7 m/s, 与无涵洞时该断面的平均流速较为接近。

2.3 涵洞下游河床局部冲淤变化

目前, 穿漳涵洞在几次水毁修复后, 其下游局部冲刷仍较严重, 使得涵洞的稳定性受到影响。因此, 笔者就箱形涵洞对其下游河床局部冲淤的影响进行了试验。图6为在两种来水工况下, 箱形涵洞下游CS6断面的河床冲淤图。

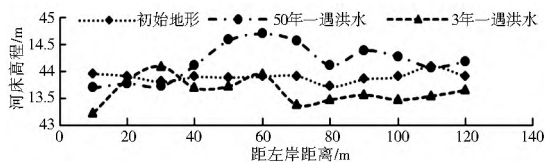


图6 CS6断面的河床冲淤

Fig. 6 Erosion and deposition of riverbed at the cross section of CS6

由图6可知, 在3年一遇洪水时, 箱形涵洞下游CS6断面的河床有冲有淤, 以冲刷为主, 冲刷集中区位于左岸近区

以及河中心至右岸的河床。其中,左岸近区河床的冲刷最为严重,冲刷深度在 0.7 m 左右;而河中心至右岸区域河床的冲刷深度在 0.3~0.5 m 间;断面的平均冲刷深度约为 0.5 m。而文献[6]中冲刷较少的圆弧形涵洞在该断面的冲刷集中在距左岸 30~60 m 的河床,冲刷深度在 0.8~1.5 m 间,断面平均冲刷深度约为 0.67 m。可见,箱形涵洞在洞后的局部冲刷深度较圆弧形涵洞还要小。经分析,主要原因是在箱形涵洞的洞后能形成较良好的水跃形式。利用能量方程和连续方程^[2,6]可以计算出,在 3 年一遇洪水工况时箱形涵洞下游收缩断面的 Fr 数^[12-14]为 4.52,属于稳定水跃^[2,6,15],其消能率较高,并且在涵洞背水面设计有消力坎,总体消能效果比圆弧形涵洞要好,因此冲刷深度较小。

而在 50 年一遇洪水工况下,箱形涵洞下游 CS6 断面也出现了文献[6]中两种穿河涵洞背水面河床的回淤现象,其淤积范围为距左岸 40 m 至右岸的河床区域。但是,箱形涵洞背水面淤积深度在 0.6 m 以下,而文献[6]中的圆弧形和梯形涵洞在该断面的淤积深度分别达 0.8~1.7 m 之间和 1.5 m 左右。

3 结论

通过对箱形涵洞上游壅水、上下游各断面流速及其下游河床局部冲刷变形等方面进行试验研究,得到以下结论。

(1) 箱形涵洞对上游河床的壅水程度较梯形和圆弧形涵洞都要小,且箱形涵洞上游河床壅水水量随来水流量的增大而减少。在 3 年一遇和 50 年一遇洪水工况下,箱形涵洞的最大壅水高度分别为 0.57 m 和 0.3 m。

(2) 在 3 年一遇和 50 年一遇两种来水工况下,与无涵洞时相比,箱形涵洞上游各断面的平均流速均有所减小,但减小程度不大,且断面横向流速分布曲线较为平坦。在下游较远的 CS8 断面的平均流速较无涵洞时均相差不大,说明箱形涵洞对其下游河道水流的影响范围截至到 CS8 断面附近。在涵洞的迎水面均出现河中心流速较左右岸流速大的现象,但较不明显。本次研究发现,在两种来水工况下,下游水流主流线均向左岸偏移。这一现象可能会对原河道的左岸滩地产生较大影响,所以建议对箱形涵洞下游左岸进行防护。

(3) 箱形涵洞下游能形成较平稳的水跃,在其背水面的河床局部冲刷程度较梯形和圆弧形涵洞均要小。同时,从上游壅水以及涵洞上下游各断面的水流流速特性来看,箱形涵洞具有较优的水力条件。

综上所述,在穿河涵洞的实际工程中可以作箱形涵洞取代施工复杂的圆弧形涵洞。

参考文献(References):

[1] 胡一三. 节点议[J]. 人民黄河, 2002, 24(4): 13-14. (HU Yi san. Node Considered[J]. Yellow River, 2002, 24(4): 13-14. (in Chinese))

[2] 裴杰峰. 穿漳涵洞工程稳定性分析[J]. 海河水利, 2007, (4): 56-58. (PEI Jie feng. Stability Analysis of Culvert Crossing Zhanghe River[J]. Haihe Water Resources, 2007(4): 56-58. (in Chinese))

[3] 孙亚东,董丽丽. 万两河水利枢纽工程溢流坝水工模型试验研究[J]. 吉林水利, 2012, (4): 5-7, 11. (SUN Ya dong, DONG Li li. The Research of Stepped Spillway Hydraulic Characteristics in Nuer Jia Reservoir[J]. Jilin Water Resources, 2012, (4): 5-7, 11. (in Chinese))

[4] 田佳,杨川. 两种方案下灞河橡胶坝库区冲刷研究[J]. 科技信息, 2010, (11): 794-795. (TIAN Jia, YANG Chuan. Study on the Siltation of Two Methods in the Reservoirs of Rubber Dams in Ba River[J]. Science & Technology Information, 2010, (11): 794-795. (in Chinese))

[5] 陈言凯,何继红. 花凉亭灌区渠首滚水坝冲刷成因分析[J]. 水利科技与经济, 2003, 9(4): 264-265. (CHEN Yan kai, HE Ji hua. Analysis and Treatment Approach of Overflow Dam Ddownstream Erision in Hualiangting Irrigation Administration [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2003, 9(4): 264-265(in Chinese))

[6] 张鸿清,杨纪伟,董彦超,等. 两种不同截面穿河涵洞对河床冲刷的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 50-52, 133. (ZHANG Hong-qing, YANG Ji-wei, DONG Yan-chao. Experimental Study on the Impacts of Culverts Crossing the River with Two Different Sections on Riverbed Erosion and Deposition Deformation [J]. South or North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 50-52, 133. (in Chinese))

[7] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 133-134. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. Sediment Transport Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 133-134. (in Chinese))

[8] 曲同祥. 漳河节点工程作用探析[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2005, (1): 38-39. (QU Tong-xiang. Rode of Zhanghe river[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 2005, (1): 38-39. (in Chinese))

[9] 廖小永,卢金友. 悬移质泥沙运动相似条件探讨[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(6): 1-3, 9. (LIAO Xiao-yong, LU Jir-you. Discussion on Similar Conditions of Suspended Sediment Transport[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(6): 1-3, 9. (in Chinese))

[10] 卢金友,廖小永,王家生,等. 模型几何变态对弯道悬移质泥沙冲刷变形影响试验研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 14-18. (LU Jir-you, LIAO Xiao-yong, WANG Jia-sheng, et al. Experimental Study on Effects of Model Geometrical Distortion upon Suspended Sediment Scouring and Silting in Bent Reaches[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 14-18. (in Chinese))

[11] 乐培九. 动床模型泥沙运动相似问题[J]. 水道港口, 2005, 26(1): 1-5, 16. (YUE Pei-jiu. Similarity of Sediment Movement of Movable bed[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2005, 26(1): 1-5, 16. (in Chinese))

[12] 尹进步,梁宗祥,龚红林. 宽尾墩三元水跃特性试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1333-1338. (YIN Ji-bu, LIANG Zong-xiang, GONG Hong-lin. Experimental Study on Now Characteristics of 3D Hydraulic Jump of Flaring Gate Piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1333-1338. (in Chinese))

(下转第 105 页)

对水电站多机组共用的尾水阻抗调压室水头损失系数进行三维数值模拟, 研究表明: 在边界条件选取合适的情况下, 从数量级和变化规律上来看, 数值模拟的计算结果和物理模型试验相比具有较好的一致性, 因此今后可以将此方法作为一种重要的手段用于电站多机组共用调压室的设计和优化。

参考文献(References):

- [1] 李玲, 李玉梁, 黄继汤, 等. 三岔管内水流流动的数值模拟与试验研究[J]. 水利学报, 2001, 3(3): 40-53. (LI Ling, LI Yuliang, HUANG Jitang, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on Water Flow in Y-type Tube[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 3(3): 40-53. (in Chinese))
- [2] 高学平, 张尚华, 韩延成, 等. 引水管管水力特性三维数值计算[J]. 中国农村水利水电, 2005, (12): 93-97. (GAO Xueping, ZHANG Shanghua, HAN Yancheng, et al. 3D Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics in Water Diversion Bifurcated Pipes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005, (12): 93-97. (in Chinese))
- [3] 毛根海, 章军军, 程伟平, 等. 卜型岔管水力模型试验及三维数值计算研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(2): 16-20. (MAO Genhai, ZHANG Junjun, CHENG Weiping, et al. Experimental Study and 3D Numerical Simulation on Water Flow in Y-type Pipe[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 24(2): 16-20. (in Chinese))
- [4] M. Piller, E. Nobile, J. Tomas. DNS Study of Turbulent Transport at Low Prandtl Numbers in a Channel Flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 485: 419-441.
- [5] Launder BE, Spalding DB. The Numerical Computation of Turbulent Flow[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, (3): 269-289.
- [6] 杨校礼, 高季章, 刘之平. 三岔管水流数值模拟研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(1): 48-50. (YANG Xiaoli, GAO Jizhang, LIU Zhiping. The 3D Numerical Simulation on Bifurcated Pipe Flow[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(1): 48-50. (in Chinese))
- [7] 于奎. 阻抗系数对阻抗式调压室波动幅值的影响[J]. 黑龙江水专学报, 2004, 31(2): 9-13. (YU Kui. The Function of The Impedance Factor to The Amplitude Value of The Impedance Surge Chamber[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2004, 31(2): 9-13. (in Chinese))
- [8] 蔡付林, 胡明, 曹青. 有长连接管的阻抗式调压室阻抗损失系数研究[J]. 水电能源科学, 2001, 19(4): 40-42. (CAI Fulin, HU Ming, CAO Qing. Coefficients of Head Loss of Throttled Surge Tanks with Long Linking Pipe[J]. Water Resources and Power, 2001, 19(4): 40-42. (in Chinese))
- [9] Yu Tek Li. Orifice Head Loss in The T-section of a Throttled Surge Tank[J]. Water Power, 1972, (9).
- [10] 程永光, 杨建东. 用三维计算流体力学方法计算调压室阻抗系数[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 787-792. (CHENG Yongguang, YANG Jiandong. Hydraulic Resistance Coefficient Determination of Throttled Surge Tanks by Means of Computational Fluid Dynamics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 787-792. (in Chinese))
- [11] 饶柏京, 杨建东. 不同形状阻抗孔口的阻抗系数研究[J]. 中国农村水利水电, 2006, (1): 84-87. (RAO Bojing, YANG Jiandong. Researching on Hydraulic Resistance Coefficients of Different Shape Orifices[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006, (1): 84-87. (in Chinese))
- [12] Lohner R, Parikh P. Generation of Three Dimensional Unstructured Grids by The Advancing Front Method[J]. Int. J. for Num. Meth. in Fluids, 1998, 8: 1135-1149.
- [13] J. F. Thompson, N. P. Weatherill. Aspects of Numerical Grid Generation: Current and Art[J]. AIAA, 1996: 93-3539.
- [14] P. Parikh, S. Prizadeh, R. Lohner. A Package for 3D Unstructured Grid Generation, Finite Element Flow Solution and Flow Field Visualization[R]. NASA CR, 1990: 182-909.
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis: CFD Software Principle and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [16] 孔珑. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. (KONG Long. Fluid Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese))
- [13] 范北林, 张细兵, 蔺秋生, 等. 南水北调中线工程冰期输水冰情及措施研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 66-69. (FAN Beilin, ZHANG Xibing, LIN Qiusheng. Ice Situation of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project and Ice Danger Prevention Measures[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 66-69. (in Chinese))
- [14] 陈朝, 毛舒娅, 黄海艳, 等. 跌扩型底流消能工压力分布特性的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 09(1): 36-39. (CHEN Zhao, MAO Shuya, HUANG Haiyan, et al. Experimental Study on Characteristic of Pressure Distribution about the Falling sill and Expanding Bottom flow Energy Dissipater[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 36-39. (in Chinese))
- [15] 李志威, 方春明, 王亮. 天然河湾水力特征与悬沙输移的关系[J]. 水电能源科学, 2010, 28(7): 110-113. (LI Zhiwei, FANG Chunming, WANG Liang. Relationship between Hydraulic Characteristics and Suspended Load Transportation in Natural River Bend[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(7): 110-113. (in Chinese))

(上接第100页)