

# 斯登沃代一级水电站消能试验研究

杨亚斌

(广西水电科学研究院, 广西 南宁 530021)

**摘要:** 为了取得柬埔寨斯登沃代一级水电站工程合理的消能方案, 通过对消能工的窄缝方案、宽尾墩—窄缝方案、二道坝方案、“宽尾墩+跌坎式消力池+水跃坎”等多种方案分别进行优化组合, 进行水工模型试验, 并对测试成果进行比较分析。结果表明, 提出的“宽尾墩+跌坎式消力池+水跃坎”联合消能工方案能很好的解决工程的消能防冲难题。该方案消能效果最佳且节省了工程量, 得到该工程设计部门的采纳应用。

**关键词:** 宽尾墩; 水工模型试验; 联合消能工

**中图分类号:** TV653

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2010)02—0073—04

## Test Study on Composite Energy Dissipator in Cambodia Stung Atay I Hydropower Station

YANG Yabin

(Guangxi Hydropower Research Institute, Nanning, Guangxi 530021, China)

**Abstract:** The process of experimental study on hydraulic model in Cambodia Stung Atay I Hydropower Station is introduced here. Through the repetitive experimental revisions for original design, a better composite energy dissipator scheme of the flaring gate pier and plunge pool and hydraulic jump bucket is put forward to solve the problems of energy dissipation and erosion control. The results show that this scheme could economize the project amount and could be adopted by the station.

**Keywords:** flaring gate pier; hydraulic model test; composite energy dissipator

### 0 前言

斯登沃代水电站位于柬埔寨菩萨省列文县的额勒赛河上游支流—沃代河上, 项目由两个梯级电站组成。一级为坝后式电站, 水库正常蓄水位 515.0 m、相应库容为  $4.438 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 死水位 510.0 m、相应库容  $2.714 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 调节库容  $1.723 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 总装机容量 20 MW。

斯登沃代一级水电站属 II 等大(2)型工程, 主要水工建筑物由混凝土重力挡水坝、2 孔溢流坝、1 孔冲沙底孔、引水系统和坝后式厂房等组成。最大坝高 45.5 m, 溢流堰为 WES 型实用堰, 设计水头 11.026 m, 每孔净宽 12.0 m。设计洪水流量( $P=1\%$ )为  $2520 \text{ m}^3/\text{s}$ , 设计洪水位为 515.01 m, 校核洪水流量( $P=0.1\%$ )  $3710 \text{ m}^3/\text{s}$ , 校核洪水位为 516.36 m; 消能防冲按 50 a 一遇洪水设计, 相应流量( $P=2\%$ )  $2170 \text{ m}^3/\text{s}$ <sup>[1]</sup>。枢纽布置见图 1。

### 1 消能工试验研究

为了验证和优化消能方案的合理性, 进行了水力学整体模型试验。模型按佛劳德准则设计, 为正态局部动床模型, 几何比尺  $\lambda_v = 66.66$ 。动床模型砂粒径按公式  $V = K\sqrt{D}$  计算, 式中试验取  $K = 5.5$ 。根据设计提供岩石允许不冲流速计算选用模型砂粒径, 当河床岩层分别为 475 m~473 m、473

m~465 m、465 m~443 m 高程, 河床允许抗冲流速分别为 1.8 m/s~2.4 m/s、2.9 m/s~4.0 m/s、5.0 m/s~8.0 m/s, 模型砂粒径分别为 0.15 cm~0.30 cm、0.4 cm~0.8 cm、1.2 cm~3.0 cm<sup>[2]</sup>。试验按岩层不同抗冲流速选择的模型砂粒径分层铺设。通过试验研究, 溢流堰泄流能力、时均压力等均满足要求, 但下游消能效果较差<sup>[3]</sup>。试验对多个消能工体型进行优化, 以使挑流水舌分布更均匀、挑距合适且冲刷更小, 并通过对水舌和冲坑等特性的观测来验证改进结果。

#### 1.1 窄缝方案

窄缝方案为设计原方案, 采用卧底式窄缝差动挑坎, 消能形式为挑流消能, 其结构尺寸见图 2。

当下泄洪水流量  $2170 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 堰面水舌扁平, 池内无反向漩滚体, 水深浅, 坎后涌浪加剧, 左侧少许水翅冲击底孔墙顶部后飞溅成水花。出坎水流未能有效的往右扩散, 水舌宽度几乎与孔口等宽。坎末水舌下缘顺流方向有一长约 12 m 的空腔。附跳水舌跳距远, 约于下 0+110 m 处入水。由于下游水深小, 以远驱水跃与下游水流衔接, 与底孔出口水舌汇合后, 涌浪加剧, 形成强烈的多级人字形水跃波, 一直延伸至下游 500 m 处。因下游主流偏于左岸, 导致右岸自下 0+120 m 至下 0+400 m 为回流区, 最大回流流速达 5.35 m/s; 左岸回流区范围小, 但强度较大, 最大回流流速达 5.25 m/s, 位于下 0+160 m 处。岸边回流较大, 对主流有一定压缩作用, 致使主流过水断面减少, 流速增大, 河床最大底部流速达 19.60

m/s, 最大岸边波浪爬高达 8.82 m。当下泄洪水流量 2 598.4 m<sup>3</sup>/s 时, 由于表孔过流量明显增大, 下游河床主流偏于右岸, 流速、浪高等水力要素指标明显增大, 消能率很低, 下游余能较大<sup>[4]</sup>。

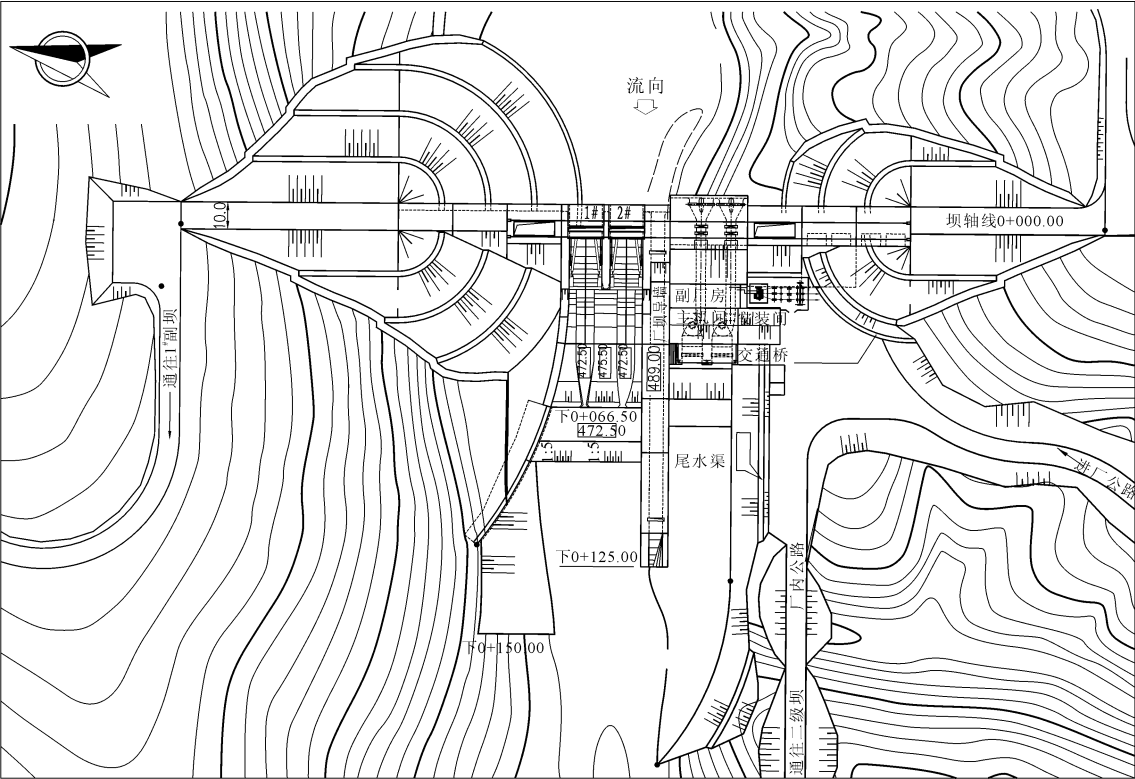


图 1 枢纽布置平面图

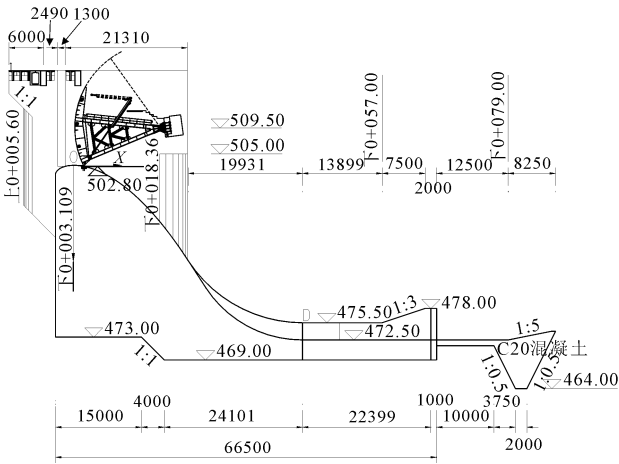


图 2 窄缝方案消能工结构布置图

1.2 宽尾墩—窄缝方案

宽尾墩—窄缝方案保持挑流消能工方案卧底式窄缝差动挑坎体形不变, 将直尾墩改为宽尾墩, 并于堰面反弧与窄缝坎直段连接处设一消力坎, 坎高 2.5 m, 宽 2.5 m。宽尾墩体形参数见表 1。

表 1 宽尾墩体型参数

| 体型 | 长/m   | 宽/m  | 起扩点<br>高程/m | 墩末顶<br>高程/m | 收缩角<br>/(°) | 收缩比<br>$\beta = B/L$ |
|----|-------|------|-------------|-------------|-------------|----------------------|
| I  | 11.33 | 3.80 | 499.80      | 496         | 19.38       | 0.36                 |

设置辅助消能工, 旨在增加水流阻抗, 强迫消能。试验结果显示出有较好的效果, 下游流态较原方案明显得到改善, 池内水深增加, 底流速降低, 下泄水流在宽尾墩的作用下和消力坎受阻后水流分散促进消能。尾坎流速分布趋于均匀, 消能效果显著, 下游水面衔接平顺。当下泄洪水流量 2 170 m<sup>3</sup>/s 时, 二次跌水水位高点 and 低点分别为 484.65 m 和 481.98 m, 落差 2.67 m。河床最大底部流速 14.20 m/s, 最大波浪爬高为 3.06 m; 尾坎末 2# 孔中面底流速分别为 11.34 m/s 和 16.27 m/s。

宽尾墩—窄缝方案设置消力坎, 增加水流阻抗, 强迫消能。但下泄高速水流直冲底板和消力坎, 冲击能量巨大, 受阻后剧烈翻腾, 涌浪很高, 墙边水位高点 493.80 m, 底孔导墙墙顶高程 489.0 m, 高度明显不足, 消力坎处流速高达 26.0 m/s。

1.3 二道坝消能方案

二道坝消能方案在下 0+ 070.50 m 处设置二道坝, 二道坝末端桩号为下 0+ 092.74 m 与护坦连接, 护坦末端桩号为下 0+ 112.60 m。二道坝坝顶高程 481.30 m, 结构尺寸见图 3。

试验表明, 在下泄洪水流量 2 170 m<sup>3</sup>/s 时, 堰面水舌扁平, 池内形成不稳定的淹没底流水跃流态。急流在池内剧烈转向导致很大的跳动涌浪。二道坝顶水流涌浪远高于厂坝导墙顶端, 水流四处溢漫。二道坝后与下游衔接水流形成强烈的二级跌差, 坎顶高点水位为 495.78 m, 二次跌水落差达 15.96 m。河床最大底部流速 9.65 m/s。

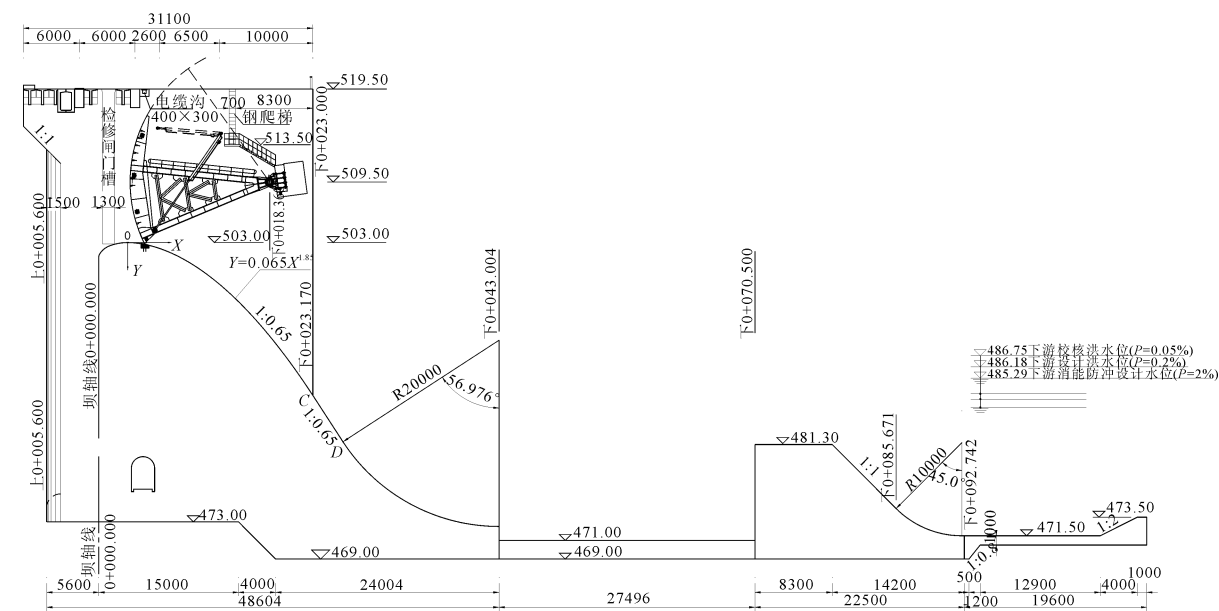


图 3 二道坝消能工结构布置图

1.4 “宽尾墩+ 跌坎式消力池+ 水跃坎”消能工方案

通过上方方案的试验研究,宽尾墩—窄缝方案消能效果较好。但宽尾墩—窄缝方案存在下泄高速水流直冲底板和消力坎,冲击能量巨大,受阻后剧烈翻腾,涌浪很高的问题,必须进一步进行体型优化。通过试验分析,提高反弧末端高程,降低库池底板高程,形成跌坎式消力池,增加了水深,降低水流冲击底板强度;增大宽尾墩收缩角,减小收缩比,增加下泄,从而形成“宽尾墩+ 跌坎式消力池+ 水跃坎”联合消能工。试验进行了三个体型尺寸的试验研究,结构尺寸见表 2 和图 4。

通过试验,宽尾墩体型合理,但水跃坎前缘位置是研究的重点,试验对 I、II 体型进行比较,当下泄流量  $2\ 170\ \text{m}^3/\text{s}$  时,两者的池底流速分别为  $12.0\ \text{m/s}$  和  $12.7\ \text{m/s}$ ; 坎顶面底流速分别为  $6.91\ \text{m/s}$ 、 $9.07\ \text{m/s}$  和  $7.24\ \text{m/s}$ 、 $7.76\ \text{m/s}$ 。二次跌水前者衔接较为平顺,说明后者稍逊于前者,但从既能满足消能要求又节省工程投资等综合因素考虑,经优化拟用 III 体型。

1.4.1 水流流态

百年一遇洪水流量时,上游水流平顺,无回流。受上游弯道河段的影响,来流略偏于左岸,与坝轴线不完全正交,2<sup>#</sup>孔左侧进水出现与坝轴线约成  $75^\circ$  夹角的斜向水流,造成 2<sup>#</sup>孔进口水面不对称的侧收缩。两侧水面有高差,左低右高,最大高差达  $1.0\ \text{m}$ 。两孔两侧的检修闸门槽处形成对称的方向相反的两个漩涡,时而出现串通式漏斗漩涡,上粗下细,呈弯曲状,其尾迹呈白色水带落在门槽下游边墙底部。墩顶跌流坎导向作用明显减弱,闸室水面曲率变化很小,宽尾墩处水面趋于直线形,出室水舌平面上与闸室等宽<sup>[5]</sup>,中部沟浅,在横断面上呈“T”形,池内涌浪高,坎后二次跌水明显,落差达  $5.74\ \text{m} \sim 7.59\ \text{m}$ 。坎后主流偏于右岸,如下泄设计洪水流量  $2\ 446\ \text{m}^3/\text{s}$ ,右岸边最大流速为  $5.48\ \text{m/s}$ ,位于右岸下 0+

250 m,左岸边最大流速为  $5.24\ \text{m/s}$ ,位于下 0+ 200 m; 下 0+ 110 m~ 0+ 165 m 有一回流区,最大回流流速为  $3.43\ \text{m/s}$ 。河道中部最大面流速为  $12.94\ \text{m/s}$ ,位于下 0+ 160 m; 河床最大底部流速为  $5.52\ \text{m/s}$ ,位于下 0+ 250 m。流速的分布随着流程而逐渐均化,于下 0+ 250 m 处河道断面流速分布趋于均匀,与天然情况接近。

在下泄流量  $Q \leq 2\ 170\ \text{m}^3/\text{s}$  时,闸门局部开启,因受到宽尾墩的约束作用和顶部跌流的影响,过闸水流被收缩成下部窄上部宽的射流,在横断面上射流呈中间低两侧高的“Y”字形; 由于三元水流,收缩主流贴堰面而下,上部水舌呈跌流状和消力池底板成一锐角注入并池,其水平方向的分量参与底流消能,其竖直方向的分量和消能井水垫碰撞消能,从而加剧水流掺混、紊动和动能的消刹,掺气量剧增,消能充分。下泄流量  $Q \leq 1\ 030\ \text{m}^3/\text{s}$  时,消能池内呈淹没底流水跃,池底流速小,为  $7.98\ \text{m/s}$ ,坎后二次跌水差  $\leq 3.55\ \text{m}$ 。

在闸门全开和大开度时池底流速较大,消能池将高流速脱离池底效果明显弱,消能池作用不完全,原因是池深不足,但在实际运行中,大洪水频率相当小<sup>[6]</sup>。

1.4.2 下游冲刷

冲刷深度与下泄流量成正比,随着下泄流量的增大而增加。下泄流量  $\geq 1\ 030\ \text{m}^3/\text{s}$  时,右岸边坡脚护坦末附近冲坑深度为  $3.18\ \text{m} \sim 6.25\ \text{m}$ ,后坡比为 1:3.66~ 1:5.13,满足规范要求。

当下泄流量  $2\ 170\ \text{m}^3/\text{s}$  时,受出坎斜向水流二次跌水冲击旋滚的紊动作用和因边壁效应产生的环流的影响,右岸边坡脚护坦末附近岸边地形下切较深,深点高程  $467.71\ \text{m}$ ,位于下 0+ 113 m; 由于坎下回流的作用,下游带回不少沙子,主河槽坎末护坦上则堆淤成三角形的回淤体。护坦下游冲刷坑范围广,冲坑深点高程  $470.31\ \text{m}$ ,位于下 0+ 113 m,后坡比为 1:3.77,冲坑前坡有堆丘,淤积量较大,但冲坑较浅,后坡比缓,不致于影响坝体的安全。

表 2 “宽尾墩+ 跌坎式消力池+ 水跃坎”联合消能工体型参数

| 体型  | 宽尾墩     |         |             |             |             |         | 消力池          |            | 水跃坎        |            |            |              |
|-----|---------|---------|-------------|-------------|-------------|---------|--------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
|     | 长<br>/m | 宽<br>/m | 起扩点<br>高程/m | 墩末顶<br>高程/m | 收缩<br>角/(°) | 收缩<br>比 | 反弧末端<br>高程/m | 池底<br>高程/m | 尾坎<br>前缘/m | 尾坎<br>后缘/m | 尾坎<br>高程/m | 尾坎<br>挑角/(°) |
| I   |         |         |             |             |             |         | 473.5        | 471.0      | 下 73.1     | 下 90.1     | 481.0      | 26.57        |
| II  | 10.62   | 4.20    | 499.00      | 496.00      | 22.78       | 0.30    | 473.5        | 471.0      | 下 79.1     | 下 90.1     | 481.0      | 26.57        |
| III |         |         |             |             |             |         | 473.5        | 471.0      | 下 78.0     | 下 88.1     | 480.0      | 26.57        |

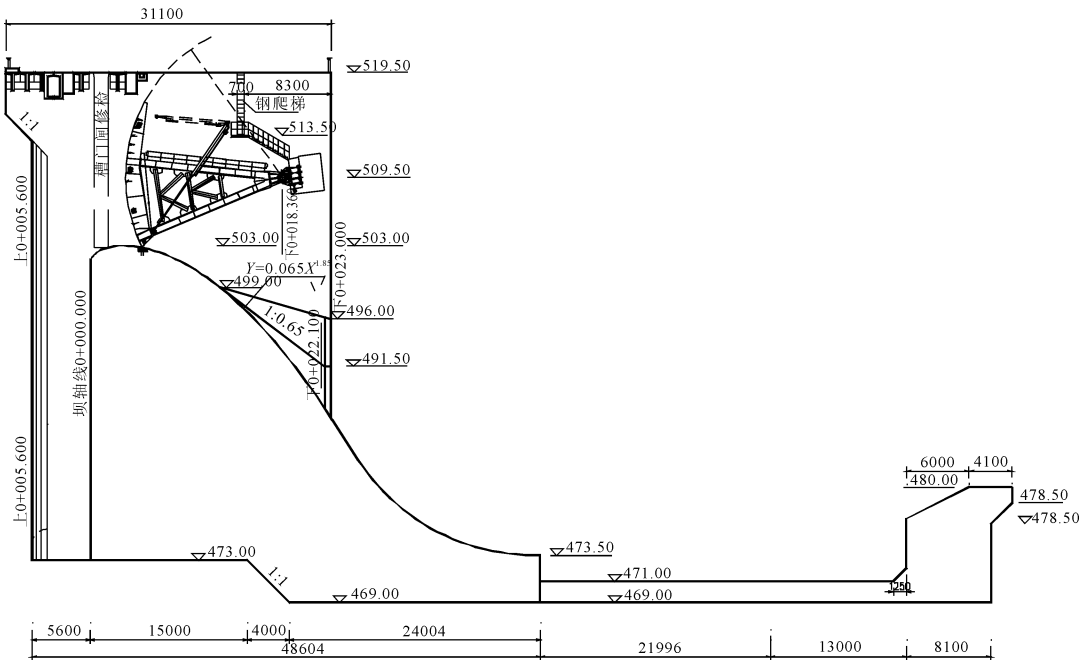


图 4 “宽尾墩+ 跌坎式消力池+ 水跃坎”联合消能工结构布置图

2 结 语

消力池+ 水跃坎”消能方案消能效果最好,很好的解决了工程的消能难题。各方案测试成果见表 3。

通过多个方案试验 成果的比较分析,“宽尾墩+ 跌坎式

表 3  $Q_{2\%}=2170\text{ m}^3/\text{s}$  各方案测试成果比较

| 方 案                                       |      | 窄缝方案                    | 宽尾墩—窄缝方案                   | 二道坝方案                      | “宽尾墩+ 跌坎式消力池+ 水跃坎” 方案      |
|---|------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 池底流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )     |      | 26.30/ 24.20, 下 0+ 045  | 未测                         | 未测                         | 12.79/ 下 0+ 055            |
| 坎末流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )     |      | 24.38                   | 11.34/ 16.27               | 涌流量测困难                     | 7.24/ 7.76                 |
| 河床最大底部流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |      | 19.60/ 下 0+ 110, 0+ 155 | 14.20/ 下 0+ 095, 0+ 168    | 9.65/ 下 0+ 105, 0+ 168     | 8.24/ 下 0+ 165, 0+ 177     |
| 最大面流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )    |      | 16.74/ 下 0+ 200, 0+ 164 | 13.60/ 下 0+ 095, 0+ 168    | 11.05/ 下 0+ 170, 0+ 174    | 13.2/ 下 0+ 165, 0+ 177     |
| 岸边最大流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )   | 左岸   | 6.34/ 下 0+ 200          | 3.40/ 下 0+ 200             | — 5.06/ 下 170              | 8.50/ 下 0+ 225             |
|   | 右岸   | — 5.35/ 下 0+ 300        | 3.22/ 下 0+ 200             | 3.01/ 下 0+ 200             | 2.05/ 下 0+ 225             |
| 最大波浪爬高/m                                  | 左岸   | 7.08/ 下 0+ 215          | 3.06/ 下 0+ 215             | 3.28/ 下 0+ 245             | 3.03/ 下 0+ 265             |
|   | 右岸   | 8.82/ 下 0+ 215          | 2.89/ 下 0+ 265             | 3.30/ 下 0+ 245             | 2.88/ 下 0+ 270             |
| 墙边高点水位/ m                                 |      | 491.87<br>下 095, 0+ 174 | 493.80<br>下 0+ 055, 0+ 142 | 495.78<br>下 0+ 075, 0+ 164 | 490.01<br>下 0+ 055, 0+ 164 |
| 坎末水位差/ m                                  | 坎顶   | 483.94                  | 484.65                     | 495.78                     | 488.21                     |
|   | 二次跌水 | 481.67                  | 481.98                     | 479.82                     | 481.75                     |
|   | 差 值  | 2.27                    | 2.67                       | 15.96                      | 6.46                       |

切的关系, 在供水范围的中心区域建厂并不一定经济。

表 1 用水区之间距离( km)

| 村庄名          | 曹街<br>(30000) | 段庙<br>( 3000) | 楚桥<br>( 3000) | 乐土镇<br>( 18000) | 中孟<br>(2000) | 三义镇<br>(16000) | 任庄<br>( 2000) | 徐邵<br>( 4000) | 庙西<br>(3000) | 陈仙桥<br>(3000) | 刘油坊<br>(2000) |
|--------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|--------------|----------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 曹街 $B_1$     | 0             | 5             | 8             | 10              | 6            | 4              | 8             | 7             | 9            | 10            | 13            |
| 段庙 $B_2$     | 5             | 0             | 4             | 5               | 3            | 3              | 6             | 5             | 5            | 7             | 9             |
| 楚桥 $B_3$     | 8             | 4             | 0             | 2               | 4            | 6              | 7             | 5             | 3            | 7             | 8             |
| 乐土镇 $B_4$    | 10            | 5             | 2             | 0               | 4            | 6              | 6             | 4             | 2            | 5             | 5             |
| 中孟 $B_5$     | 6             | 3             | 4             | 4               | 0            | 3              | 4             | 2             | 5            | 7             | 5             |
| 三义镇 $B_6$    | 4             | 3             | 6             | 6               | 3            | 0              | 3             | 6             | 7            | 6             | 9             |
| 任庄 $B_7$     | 8             | 6             | 7             | 6               | 4            | 3              | 0             | 2             | 4            | 7             | 6             |
| 徐邵 $B_8$     | 7             | 5             | 5             | 4               | 2            | 6              | 2             | 0             | 4            | 3             | 5             |
| 庙西 $B_9$     | 9             | 5             | 3             | 2               | 5            | 7              | 4             | 4             | 0            | 4             | 4             |
| 陈仙桥 $B_{10}$ | 10            | 7             | 7             | 5               | 7            | 6              | 7             | 3             | 4            | 0             | 3             |
| 刘油坊 $B_{11}$ | 13            | 9             | 8             | 5               | 5            | 9              | 6             | 5             | 4            | 3             | 0             |

注: 括号内为当地人口数。

3 结 论

- (1) 利用供水规模与供水半径、工程投资、制水成本的关系, 为供水规模的研究提供理论依据。合理选择供水规模对工程的经济性和可持续运行起着至关重要的作用。
- (2) 运用线性规划求解方法对供水范围内的水厂厂址进行优化选择, 对厂址的选择提供了决策依据, 对供水工程的高效运行和对工程投资的有效利用有着重要的参考意义。
- (3) 本文的研究对象是蒙城平原地区, 而对于山区、丘陵等地形起伏较大、水源不稳定且用户较分散地区, 文中的方法有一定的局限性, 如何解决这类地区的供水规划问题有待进一步的研究。文中单位供水成本  $k$ , 需要大量工程资料进行参数拟合, 需随着工程进行进一步修正。

参考文献:

[ 1] 刘学功, 刘文朝, 崔招女. 农村供水工程发展模式及工程规划设计应注意的问题[ J]. 中国水利, 2005, ( 17): 59 61.

[ 2] 杨继富. 农村饮水安全科技支撑现状及建议[ J]. 中国水利, 2007, ( 17): 16 18.

[ 3] 郭孔文, 胡 孟. 农村供水工程发展模式探讨[ J]. 中国水利, 2006, ( 19): 38 40.

[ 4] 任鸣鸣, 杨 超, 何 波. 生产成本规模递减的工厂选址和规模决策[ J]. 工业工程与管理, 2007, 12( 6): 98 103.

[ 5] 方红远, 王银堂. 边际成本分析在水资源开发利用决策中的应用[ J]. 水科学进展, 2004, 15( 2): 243- 248.

[ 6] 严煦世, 范瑾初. 给水工程[ M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[ 7] 白 丹. 树状给水管网的优化[ J]. 水利学报, 1996, ( 11): 52- 56.

[ 8] 《运筹学》教材编写组. 运筹学( 第三版) [ M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

( 上接第 76 页)

宽尾墩—消力戽联合消能工已在我国多个水电工程中应用, 但在下游水深浅, 水位变幅大, 弗汝德数低的中小水电站应用中, 宽尾墩—消力戽联合消能工的应用还值得研究<sup>[7]</sup>。本文通过对斯登沃代一级水电站消能工多个方案的研究比较, 将传统的消力戽进行结构优化, 提出“宽尾墩+ 跌坎式消力池+ 水跃坎”联合消能工方案, 很好的解决了工程消能难题, 可为同类工程提供参考。

参考文献:

[ 1] 广西水电科学研究院. 柬埔寨斯登沃代一级水电站水工模型试验研究报告[ R]. 南宁: 广西水电科学研究院, 2009.

[ 2] 刘国贵, 刘国华, 陈 斌. 红石岩水电站工程动床模型试验研究

[ J]. 水力发电, 2005, 31( 6): 27 28.

[ 3] 郭子中. 消能防冲原理与水力设计[ M]. 北京: 科技出版社, 1982.

[ 4] 庞昌俊, 冬俊瑞, 黄种为. 面流消能工程的运行情况分析[ C] // 刘沛清. 水工建筑物消能防冲论文集选. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.

[ 5] 罗秉珠. 宽尾墩戽式消力池在岩滩水电站设计中的应用[ J]. 红水河, 1990, ( 1): 17 26.

[ 6] 杨亚斌, 李 新. 洞巴水电站高陡槽溢洪道挑流鼻坎体型优化试验研究[ J]. 广东水利水电, 2009, ( 2): 28- 30.

[ 7] 余子丹. 中低水头宽尾墩联合消能工的应用与认识[ J]. 水利水电科技进展, 2009, 29( 2): 36 39.