

# 阜平抽水蓄能电站上水库进/出水口布置及结构设计

王健楠<sup>1</sup> 张文鹏<sup>2</sup> 陈天城<sup>1</sup> 康天宇<sup>1</sup>

1 深能阜平蓄能发电有限公司 2 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

DOI:10.12238/hwr.v8i10.5765

**[摘要]** 为早日实现碳达峰、碳中和及能源结构有序调整的目标,可再生能源显得尤为重要。抽水蓄能电站技术成熟、经济可靠,调节能力强,相比风能、光能其调节灵活性、稳定性及供电质量更高。文章介绍了阜平抽水蓄能电站上水库进/出水口的布置、体型参数的确定及设计过程,总结了进/出水口布置原则,提供了设计的算法。

**[关键词]** 抽水蓄能电站; 进/出水口; 淹没深度; 体型设计

**中图分类号:** TV743 **文献标识码:** A

## Layout and structural design of inlet and outlet of upper reservoir of Fuping pumped storage power station

Jiannan Wang<sup>1</sup> Wenpeng Zhang<sup>2</sup> Tiancheng Chen<sup>1</sup> Tianyu Kang<sup>1</sup>

1 Shenneng Fuping Energy Storage Power Generation Co., Ltd

2 China Power Construction Corporation Beijing Survey and Design Institute Co., Ltd

**[Abstract]** In order to achieve the goal of carbon peak, carbon neutrality and orderly adjustment of energy structure, renewable energy is particularly important. Pumped storage power station has mature technology, economic and reliable, strong regulation ability, and higher regulation flexibility, stability and power supply quality than wind energy and light energy. This paper introduces the layout of the inlet/outlet of the upper reservoir of Fuping pumped storage power Station, the determination of the shape parameters and the design process, summarizes the layout principle of the inlet/outlet and provides the design algorithm.

**[Key words]** pumped storage power station; inlet/outlet; inundation depth; shape design

### 引言

在我国电力系统能源结构化和可持续发展道路中,抽水蓄能电站凭借其独特的储能技术以及灵活的调频、调相功能发挥着重要作用。近年来,为早日实现碳达峰、碳中和的目标,加快绿色能源转型,抽水蓄能电站在国内得到了大力发展。

抽水蓄能电站作为风、水、光、储一体化的重要一环,其建设可促进水电能源基地的发展,加快构建新型电力系统,促进新能源规模化开发消纳。

### 1 工程概况

阜平抽水蓄能电站位于河北省保定市阜平县境内,电站初拟装机容量为1200MW(共4台机组),额定发电水头395m。电站采用中部厂房布置方案,枢纽建筑物主要由上水库、输水系统、地下厂房系统及地面开关站、下水库和补水系统等组成。

本工程为一等大(1)型工程,永久性主要建筑物为1级建筑物,永久性次要建筑物为3级建筑物。输水系统由引水系统和尾水系统两部分组成,引水系统采用“一管两机”供水方式,尾水系统采用“两机一洞”的布置型式,共有两套独立的输水系统。

引水系统建筑物包括上水库进/出水口、引水事故闸门井、引水隧洞、引水调压室、高压管道、引水岔管、引水支管;尾水系统建筑物包括尾水支管、尾水事故闸门室、尾水岔管、尾水调压室、尾水隧洞、尾水检修闸门井和下水库进/出水口。

### 2 上水库进/出水口布置

抽水蓄能电站进/出水口作为输水系统的重要节点工程,既是起点又是终点,在发电、抽水两种工况下,其内水流方向相反,具有双向过流的特点,要求进流时无有害漩涡产生,出流时水流扩散均匀、不导致拦污栅共振破坏和库岸产生冲刷,水头损失小。进/出水口布置时应结合地形地质条件及开挖库形,尽量使轴向方向与等高线垂直,减少开挖及支护工程量,进而减少投资。阜平抽水蓄能电站上水库进/出水口位于水库西南侧,此处地形适、地质条件好,边界条件基本对称,对水流流态边界干扰少,输水系统整体顺畅且线路短,且较缓的地势条件利于施工场地的布置。上水库进/出水口轴线方位角为NW352.99°。

阜平抽水蓄能电站上水库进/出水口布置于库岸边,采用侧式结构,两个进/出水口并列布置,体型相同,中心间距49m,底板

高程785m。沿发电水流方向结构依次为明渠段、前池段、防涡梁段、调整段、扩散段、闸门段,其中主体部分防涡梁段、调整段、扩散段长度共计54m。

防涡梁段长11m,为防止电站因发电、抽水工况转换频繁且水库水位变幅大而产生吸气涡旋在顶部,共设置4道防涡梁,防涡梁断面型式为平行四边形,顺发电水流方向倾角 $45^\circ$ ,梁上、下均宽1.3m,梁高2.0m,梁间距1.1m。为使水流均匀扩散,进/出水口设分流墩,分流墩宽1.5m,墩头迎水面为圆弧形;每个进/出水口分成4孔,设4扇拦污栅,单个拦污栅孔口尺寸 $5.3\text{m}\times 10.5\text{m}$ (宽 $\times$ 高)。

调整段位于防涡梁段与扩散段之间,长3m,底板水平,顶板与底板平行,与防涡梁段结合为一体。

扩散段进流时流速逐渐增大,出流时流速逐渐减小,为避免水流脱离固体边界,消除顶部负流速,扩散段平面采用双向对称扩散、立面顶板单向扩散型式。扩散段布置在地下,长40m,水平扩散角 $30.35^\circ$ ,立面扩张角 $5.0^\circ$ ;扩散段断面尺寸由 $4\text{—}5.3\text{m}\times 10.5\text{m}$ (宽 $\times$ 高)渐变到 $7.0\text{m}\times 7.0\text{m}$ (宽 $\times$ 高)。每个扩散段内由3个分流墩分成4个流道,每个流道的扩散角均不大于 $10^\circ$ 。

进/出水口段水头损失主要为局部水头损失,受水平和垂直扩散角、防涡梁尺寸及布置、流速分布、孔口尺寸、拦污栅型式、分流墩位置及布置、淹没水深等影响。阜平抽水蓄能电站上水库进/出水口段(防涡梁段、调整段、扩散段)水头损失系数发电工况为0.39,抽水工况为0.28。

### 3 上水库进/出水口体型设计

#### 3.1 拦污栅孔口尺寸

根据《水电站进水口设计规范》(NB/T10858-2021),抽水蓄能电站过栅流速宜小于 $1.0\text{m/s}$ 。依据工程经验,过栅平均流速预取值 $0.8\text{m/s}$ 。单机额定发电流量 $86.8\text{m}^3/\text{s}$ ,引水系统采用一洞两机设计方案,每个进/出水口对应两台机组流量,经计算,拦污栅孔口总面积 $217.0\text{m}^2$ ,防涡梁段由3个分流墩分成4个流道,共4扇拦污栅,每扇拦污栅孔面积: $S=S_{\text{进口}}/4=50.25\text{m}^2$ 。

引水隧洞洞径7m,拦污栅孔高取1.5倍洞径,孔高: $h=1.50\times 7\text{m}=10.5\text{m}$ ,孔宽: $b=S_{\text{进口}}/4h=5.17\text{m}$ 。实际取 $h=10.5\text{m}$ , $b=5.3\text{m}$ 。拦污栅高宽比: $h/b=1.98$ ,满足规范 $1.5\sim 2.0$ 的要求。

孔口流速 $V=Q/S=86.8\times 2/(4\times 5.3\times 10.5)=0.78\text{m/s}$ 。

实际过栅流速应为设计流量除以扣除拦污栅面积后的净过水面积。根据工程类比,拦污栅面积按20%的孔口面积考虑。故 $V'=Q/S'=86.8\times 2/(4\times 5.3\times 10.5\times (1-0.20))=0.97\text{m/s}<1.0\text{m/s}$ ,满足规范要求。

综上,进/出水口结构尺寸为 $4\text{—}5.3\text{m}\times 10.5\text{m}$ (宽 $\times$ 高)。

#### 3.2 最小淹没深度计算

根据《水电站进水口设计规范》(NB/T10858-2021)规,进/出水口上部必须有足够的淹没水深以保证在进流时不会产生吸气漩涡。确定进/出水口的底板高程,需要考虑水库死水位、孔口高度、最小淹没水深和过渡过程计算结果等因素。对侧式进/出水口最小淹没水深采用的戈登公式估算。

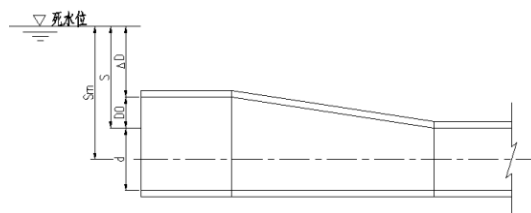


图1 进/出水口淹没深度示意图

①按戈登公式确定最小淹没深度:

$$S=CVD_1^{1/2} \quad (1)$$

式中: S—进/出水口洞顶至最低水位的深度(m);

C—系数,对称来流 $C=0.55$ ,侧向来流 $C=0.73$ ;

V—扩散段窄口处平均流速(m/s);

$D_1$ —扩散段窄口处的高度(m)。

$$V=Q/S=86.80\times 2/(\pi\times 7\times 7/4)=4.51\text{m/s}$$

$$S=0.73\times 4.51\times 7^{1/2}=8.71\text{m}, \text{设计取值: } S=10.0\text{m}$$

②最小淹没深度还应满足:

$$S=K(\Delta h_1+\Delta h_2+\Delta h_3+\Delta h_4+\Delta h_5+\frac{v^2}{g}) \quad (2)$$

式中:  $\Delta h_1\sim\Delta h_4$ —分别为进口喇叭段、拦污栅、闸门槽、渐变段的局部水头损失(m);

$\Delta h_5$ —进水口沿程水头损失(m);

V—输水道平均流速(m/s);

K—不小于1.5的安全系数。

经计算,当 $S=10.0\text{m}$ ,安全系数 $K=1.72$ ,满足规范要求。

#### 3.3 最小淹没深度验算

按照不产生贯通吸气漩涡的条件,弗洛得数 $Fr$ 应满足:

$$S/h=3.13CF_r \quad (3)$$

$$F_r=v/\sqrt{gS_m} \quad (4)$$

根据式(1)和式(4),  $S/h=(1.7\sim 2.3)F_r$  (5)

根据国内外已建进/出水口统计资料,  $F_r$  的范围为 $0.51\sim 0.56$ ,取平均值 $0.54$ 。

$$Fr=V/(\sqrt{g\times S_m})^{0.5}=Fr=0.97/(9.81\times (6.5+10.5/2))^{0.5}=0.09<0.54$$

综上,进/出水口淹没深度满足设计要求,不会产生贯通吸气漩涡。

#### 3.4 进口底板高程确定

根据设计规范,进/出水口底板为:

$$H_1=H_0-S-D_1 \quad (6)$$

式中:  $H_0$ —水库死水位(m)

进/出水口底板高程为:  $H_1=802-10-7=785\text{m}$

#### 3.5 扩散段、调整段、防涡梁尺寸设计

根据《抽水蓄能电站工程技术》,扩散段长度(不包含调整段): $L=3.58+4.289D$ (隧洞洞径, m),因此: $L=3.58+4.289\times 7.0\text{m}=33.60\text{m}$ ,取 $L=40.0\text{m}$ 。

扩散段起点结构尺寸: 4-5.3m×10.5m(宽×高), 终点结构尺寸: 7.0m×7.0m(宽×高), 则纵向扩张角:  $\theta = \arctan[(H-D)/L] = \arctan[(10.5-7.0)/40] = 5.0^\circ$ , 满足顶板扩张角宜在 $3^\circ \sim 5^\circ$ 范围的规范要求。

平面扩散角: 取分流墩宽度为1.5m, 边墩宽度1.5m, 孔口总宽:  $B=5.3 \times 4 + 1.5 \times 3 + 1.5 \times 2 = 28.7\text{m}$ 。则水平扩散角  $\beta = 2\arctan[(B-D)/2L] = 2\arctan[(28.7-7.0)/2 \times 40] = 30.35^\circ$ , 满足平面扩散角宜在 $25^\circ \sim 45^\circ$ 范围的规范要求。

调整段长度:  $L_1 = 0.40L, 0.40 \times 40\text{m} = 16.0\text{m}$ 。本工程调整段与防涡梁段结合为一体式结构, 且防涡梁段长度应与孔口高度相近, 本工程调整段设计长度取3.0m, 防涡梁段设计长度取11.0m。

为防止水流通过进/出水口时产生有害的吸气漩涡, 在防涡梁段结构的顶部共设4道防涡梁, 防涡梁断面型式为平行四边形, 顺发电水流方向倾角 $45^\circ$ , 梁上、下均宽1.3m, 梁高2.0m, 梁间距1.1m, 防涡梁进口墩柱和底板为弧形。

#### 4 进/出水口稳定设计

上水库进/出水口为1级建筑物, 结构安全级别为1级。设计需考虑运行期工况、检修工况及地震工况下进/出水口的整体抗滑稳定、抗浮稳定性、抗倾覆稳定及地基法向应力计算。因阜平抽水蓄能电站上水库采用侧式进/出水口, 且引水事故闸门井布置于山体内部, 不存在抗滑稳定和抗倾覆稳定问题, 本次仅考虑防涡梁段、拦污栅排架结构、调整段、扩散段等地面建筑物的稳定问题。

##### 4.1 计算原则及假定

(1) 进/出水口存在结构缝, 根据结构缝的设置分成块分别计算。(2) 荷载包括结构自重、静水压力、扬压力(渗透压力+浮托力)、风压力、地震力、拦污栅压差。(3) 按整体箱式结构进行稳定复核(分段进行)。(4) 渗透压力由地下水位和库内水位的水位差产生的, 各工况均选取地下水位最不利高程。(5) 防涡梁上部设有拦污栅排架, 体型较大, 建筑物较高, 在抗倾覆及地基应力计算过程中, 选用最不利防涡梁段进行计算。(6) 雪荷载在荷载中占比较小, 且弯矩计算中为有利荷载, 本计算不考虑。(7) 不考虑结构缝间止水的影响, 不计入两侧岩体与混凝土结构的摩擦力。(8) 地震工况, 上下游方向地震动水压力作用指向向墩, 属于有利荷载, 本计算不考虑地震动水压力的影响。

##### 4.2 计算公式及方法

①扬压力。根据《水电站进水口设计规范》NB/T 10858-2021, 扬压力分为渗透压力和浮托力两部分。

$$F_{\text{扬}} = 1.2F_{\text{渗}} + 1.0F_{\text{浮}} \quad (7)$$

其中渗透压力由地下水位和库内水位的水位差产生。

$$F_{\text{渗}} = \gamma_w \alpha H_1 S_{\text{底}} - \gamma_w H_2 S_{\text{底}} \quad (8)$$

浮托力按库内水位计算。

$$F_{\text{浮}} = \gamma_w H_2 S_{\text{底}} \quad (9)$$

②地震荷载。根据《水工建筑物抗震设计规范》NB 35047-2015中, 上水库进/出水口只需记入水平向地震惯性力。

$$E_i = a_h \times \xi \times G_{Ei} \times \alpha_i / \quad (10)$$

③风荷载。根据《水工建筑物荷载标准》(GBT 51394-2020)和《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012), 垂直作用于建筑物表面上的风荷载标准值按下式计算:

$$W_k = \beta_z \mu_s \mu_z W_0 \quad (11)$$

④冰荷载。根据冰清分析, 阜平抽水蓄能电站上最大冰厚取0.0m, 冰荷载为0。

⑤抗滑稳定计算。进水口整体抗滑稳定性可按下列抗剪断强度公式计算:

$$\gamma_0 \psi \sum P_R \leq \frac{1}{\gamma_d} \left( \frac{f'_{Rk}}{\gamma_{f'}} \sum W_R + \frac{c'_{Rk}}{\gamma_c} A_R \right) \quad (12)$$

⑥抗浮稳定。抗浮稳定性可按下列公式计算:

$$K_f = \frac{\sum W_f}{\sum U_f} \quad (13)$$

⑦抗倾覆稳定性。抗倾覆稳定性可按下列公式计算:

$$K_0 = \frac{\sum M_s}{\sum M_0} \quad (14)$$

抗倾覆选用最不利的防涡梁和调整段段对其进行计算, 按照顺水流方向进行。

⑧基底面法向应力。进/出水口基础面上的法向应力计算应分别考虑计入扬压力和未计入扬压力两种情况, 按下式计算:

$$\sigma = \frac{\sum W}{A} \pm \frac{\sum MT}{J} \quad (15)$$

##### 4.3 计算结果

经计算: 上水库进/出水口整体抗滑稳定、抗浮稳定、抗倾覆稳定及地基法向应力均满足规范要求。

#### 5 结论

阜平抽水蓄能电站上水库进/出水口位置合适, 体型设计参数合理, 结构稳定, 能满足工程设计要求。

#### 【参考文献】

- [1] 水电水利规划设计总院. NB/T 10858-2021, 水电站进水口设计规范[S]. 中国水利水电出版社, 2022.
- [2] 张一鸣, 解伟, 蒋远超, 等. 沂蒙抽水蓄能电站竖井式进/出水口盖板有限元分析及配筋计算[J]. 华北水利水电大学学报. 2016, 149(6): 83-88.
- [3] 河北阜平抽水蓄能电站可行性研究报告[R]. 北京: 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 2024.
- [4] 张一鸣, 王君芳, 张翠花. 丰宁抽水蓄能电站下水库进/出水口布置及结构设计. 《河南水利与南水北调》2021-12-26.
- [5] 李东岳(导师: 高学平). 抽水蓄能电站侧式进/出水口流量分配研究《天津大学硕士论文》2015-12-01.

#### 作者简介:

王健楠(1987--), 男, 汉族, 吉林省吉林市人, 工学学士, 工程师, 研究方向: 水工结构。