

# 抽水蓄能电站输水系统参数化设计与侧式进/出水口体型设计应用

王嘉欣 杜慧超 张子阳

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710065

**摘要:** 在当前抽水蓄能电站迅猛发展背景下,各电站输水系统布局呈现多样化特征。为有效提升抽水蓄能电站设计效率,开发智能设计集成系统,主要包括上、下水库进/出水口计算、隧洞计算、调节保证设计、工程量计算等内容,实现计算的参数化及程序化过程,自动输出报告。以新疆阜康上水库侧式进/出水口体型设计为例,展示参数化设计成果,并通过水力学验证设计的合理可靠性。智能设计集成系统可为其他抽水蓄能电站输水系统的参数化和标准化设计提供参考。

**关键词:** 抽水蓄能电站; 输水系统; 集成设计; 参数化设计; 进/出水口

## 1 引言

当前,我国正处于能源转型的关键时期,抽水蓄能电站具有负荷调节率快、调节范围大等优点,被认为是满足当前和未来电力系统调峰需求的重要技术手段<sup>[1-2]</sup>。每个抽水蓄能电站输水系统都有各自特点和布置形式,给输水系统标准化设计带来一定困难。但每个抽水蓄能电站在前期设计阶段涉及的设计内容基本相似<sup>[3]</sup>,例如:淹没深度及水头损失计算、工程量计算等<sup>[4-5]</sup>。在工程前期设计过程中,相关计算内容繁多,有一定技术难度。同时,由于设计人员工作习惯不同,使用计算手段不尽相同,从而造成计算成果差异。目前,抽水蓄能电站输水系统设计计算仅限于单体结构,尚无一款软件可以集成包括管径初拟、淹没深度、水头损失计算、调压室设置判断、进水口稳定计算、钢衬结构计算、工程量计算等输水系统设计计算内容。因此,为降低提高工作效率,减少设计产品误差,对抽水蓄能电站的输水系统设计进行计算过程标准化和计算内容参数化的研究与开发是十分必要的。

抽水蓄能电站输水系统智能设计集成系统的研发,旨在根据行业相关规范将抽水蓄能电站输水系统设计过程中常用的计算公式进行整合,实现计算内容参数化、计算过程程序化和计算成果标准化,可以高质高效解决水力学、结构、工程量设计、计算成果输出等工作需求,针对性开展多方案比选和优化设计等工作的智能化辅助设计平台。该系统的研究主要包含淹没深度及水头

损失计算、上、下水库进/出水口计算、隧洞计算、调节保证设计、调压室设计、工程量计算等内容,建立简单明了的人机交互界面,实现计算的程序化过程和系统报告自动输出功能,完成整体抽水蓄能电站输水系统智能设计集成系统的搭建。

## 2 集成系统开发

### 2.1 系统概况

抽水蓄能电站输水系统智能设计集成系统在Visual Studio 2017开发环境下研发,建立独立的外部程序,子程序系统如图1所示。各模块相对独立且可单独运行,通过读取和输出指定数据文件进行参数传递。设计平台运行流程图如图2所示。通过行业相关规范将抽水蓄能电站水道设计过程中常用的计算公式进行整合,实现设计的参数化、程序化及标准化。

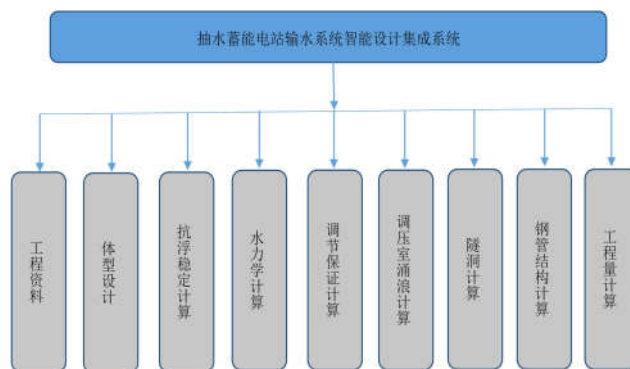


图1 系统框架示意图

### 2.2 界面介绍

系统开发流程主要包含代码设计和界面设计,界面设计是开发程序重要环节之一,秉承操作简单、界面美观、使用方便的设计原则,主要包括控件、对话框、菜

**通讯作者简介:** 王嘉欣(1999-),女,陕西西安人,主要从事水利水电水工结构设计工作。Email: wangjiaxin\_17@163.com

单、状态栏和多重窗体等属性设置。系统平台主界面如图3所示，“导航栏”包含了图1所示的各子模块内容；“子系统展示区”主要包含对应模块图片展示及功能说明；“状态栏”包含系统版权信息。

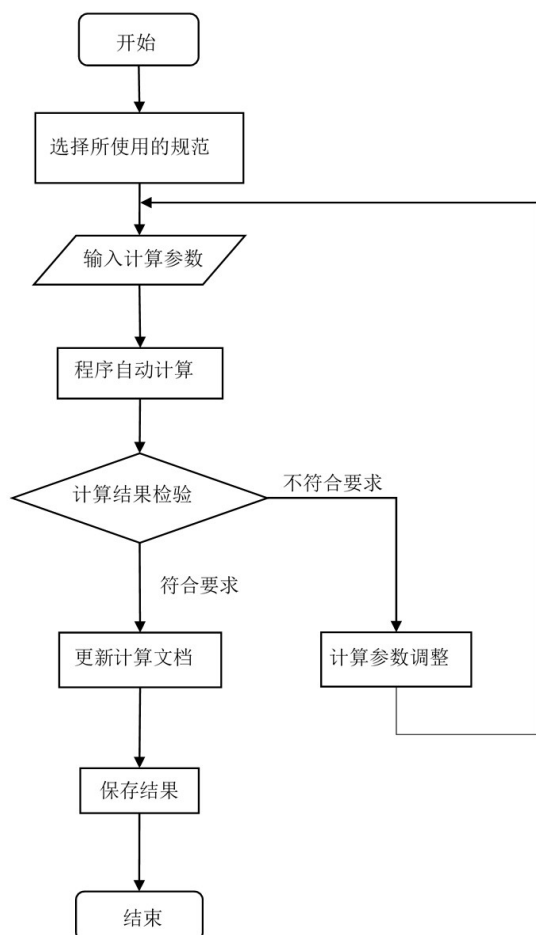


图2 程序运行流程图

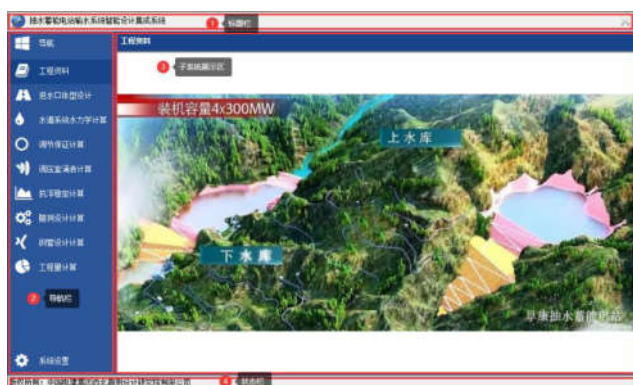


图3 集成系统平台主界面

### 2.3 特点与创新

集成设计系统能够快速完成抽水蓄能电站输水系统的前期设计，极大程度提高工程设计人员工作效率，主要特点如下：

#### (1) 架构逻辑清晰

采用数据、接口完全分离的设计方式，将软件分成界面层、数据层、接口层，保证程序高性能、高兼容性和高扩展性。各模块相对独立，仅在数据层设置接口进行数据传递，结构层次清晰，保证了各模块的解耦，又能实现模块之间数据调用，避免用户重复输入。

#### (2) 设计/计算功能强大

平台将各模块计算公式封装，用户输入工程参数，便可以得到计算结果，具有强大计算能力，且可以实现不断试算和调整以找到最优解。考虑到部分计算需要设计人员人工干预，程序留有相应接口供设计人员依照工程经验对结果校正和调整，使之接近实际情况。

#### (3) 自动生成计算书文档

程序通过Com接口，实现对SQLite数据库或数据文件的读写和word计算书的自动生成。计算完成后，单击“更新文档”按钮，计算结果自动生成到相应报告书里，减轻了设计人员繁琐的文档整理工作。

#### (4) 后续扩展性强

程序的各个计算模块相对独立，后续若有需求变更，只需在特定模块修改并重新添加到解决方案即可。同理，若要增加新模块，也可在现有项目基础上修改，编写相应的代码重新生成解决方案，即可实现新模块与原程序的无缝对接，具有良好的扩展性。

综合以上特点，可以看出：本设计平台是目前国内第一款针对抽水蓄能输水系统综合设计的平台，在行业内处于领先地位。平台的完整性和系统性，在国内首屈一指，具有强大的拓展空间，在行业内有较大应用前景。

### 3 工程应用

为了验证集成设计系统的可行性与实操性，本文采用该系统对新疆阜康抽水蓄能电站上水库进出水口的体型进行标准化及参数化设计。

#### 3.1 工程概况

新疆阜康抽水蓄能电站属日调节，纯抽水蓄能电站，位于新疆昌吉回族自治州阜康市境内。上水库位于白杨河西侧白杨沟上游的西岔沟内，利用天然地形开挖并在沟口筑坝成库，初拟的正常蓄水位为2271.0m，死水位为2237.0m，调节库容为 $662 \times 10^4 \text{m}^3$ ，机组额定流量为 $71.6 \text{m}^3/\text{s}$ 。输水系统和地下厂房位于白杨河左岸，上、下水库间的山体，采用“一洞二机”布置形式，由两个相对独立的引水单元组成。

#### 3.2 参数化设计计算

##### 3.2.1 上水库进/出水口底板高程

阜康上水库采用侧式进/出水口，一洞二机。计算

得到流量为143.2m<sup>3</sup>/s, 依照规范<sup>[6]</sup>, 过栅流速预取值为0.8m/s, 则进口断面面积为179m<sup>2</sup>, 每个进口设置3孔。进水口处隧洞直径取6.5m, 孔口高度取为10m, 则每孔的宽度取5m, 孔口流速0.95m/s。按式1计算得到过栅流速为1.19m/s, 满足要求。

$$v = Q/S' \quad (1)$$

式中:  $v$ 为过栅流速, m/s;  $Q$ 为机组流量, m<sup>3</sup>/s;  $S'$ 为扣除拦污栅面积后的净面积, m<sup>2</sup>。

根据规范<sup>[6]</sup>, 有压式进水口的底板高程应从防止产生贯通式漏斗漩涡的角度考虑, 采用式2计算得到最小淹没水深为8.25m。且最小淹没水深还需满足式3, 满足要求。

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

$$\Delta D = S - D_0 \quad (3)$$

式中:  $S$ 为最小淹没水深, m;  $C$ 为系数, 取 $C = 0.75$ ;  $V$ 为扩散窄口处断面平均流速, m/s;  $D_1$ 为扩散窄口处的高度, m;  $\Delta D$ 为进/出水口顶板下缘至最低水位的深度, m;  $D_0$ 为进/出水口顶板下缘至扩散段窄口处顶板下缘的高度, m。

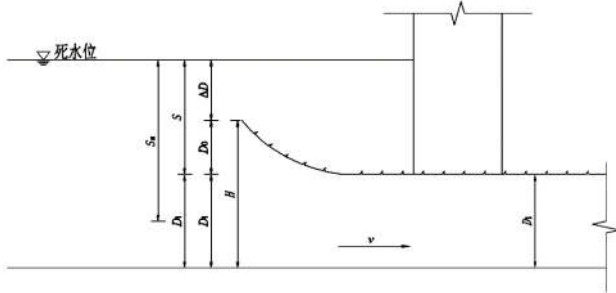


图4 进水口淹没水深示意图

对最小淹没深度验算, 按照不产生吸气漩涡的条件, 弗鲁德数 $F_r$ 应满足 $F_r < 0.23$ 。按式4计算得到 $F_r$ 为0.11, 满足要求, 故不会产生吸气漩涡。根据图5所示计算, 得到上水库进/出水口底板高程为2220m。

$$F_r = v/(g \times S_m)^{0.5} \quad (4)$$

表1 上水库进/出水口体型参数

工程部位	项目	特征
上水库	拦污栅	孔口尺寸为: 3-5×10m
	最小淹没深度	4.8m (计算要求3.25m)
	进/出水口底板高程	2220m
	防涡梁段	长度 $L = 8.4m$ , 防涡梁设置3根, 1.2m宽, 间距1.2m
	扩散段	长度 $L = 32m$ ; 起点净空为6.5m×6.5m, 末端净空为3-5×10m
引水事故闸门井	调整段	长度 $L = 10m$
		井座孔口尺寸: 3.7m×6.5m
		井身顶高程: 2275m 通气孔最小面积: 2.03m <sup>2</sup>

式中:  $g$ 为重力加速度, 取9.81m/s<sup>2</sup>;  $S_m$ 为拦污栅中心线以上的设计最小淹没深度, m。

### 3.2.2 上水库进/出水口和引水事故闸门井体型

上水库进/出水口体型主要包括扩散段和防涡梁段。扩散段长度取32m, 起点净空为6.5×6.5m, 末端净空为3-5×10m。取分流墩厚度1.4m, 边墩厚度1.5m, 调整段长度10m, 防涡梁段8.4m, 设置3根宽1.2m间距1.2m的防涡梁。

引水事故闸门井孔口尺寸3.7×6.5m。井座尺寸7.4×3.7×6.5m, 衬砌厚1.5m。闸门井前后各设一渐变段, 长12m, 衬砌厚1.5m。井身尺寸暂定为开挖内径11m, 考虑到其调压作用, 顶高程按正常蓄水位超高4m计, 故闸门井井身高度为47m。

闸门通气孔面积计算根据式5计算, 得到最小面积为2.03m<sup>2</sup>, 设计时保证通气孔大于此值即可。计算通气孔个数为1.79个, 通气孔设计两个。按管道面积4%~9%取值, 通气孔面积为: 1.33 ≤ 2.03 ≤ 2.99, 满足要求。

$$A_a = \frac{K_a Q_a}{1265 m_a \sqrt{\Delta p_a}} \quad (5)$$

式中:  $A_a$ 为通气孔最小有效面积, m<sup>2</sup>;  $K_a$ 为安全系数, 取2.8;  $Q_a$ 为通风孔进风量;  $m_a$ 为通风孔流量系数, 取0.7;  $\Delta p_a$ 为钢管内外允许气压差, 取0.05MPa。

### 3.2.3 计算成果验证

将计算成果汇总如表1所示, 为确保进/出水口满足发电和抽水运行的需要, 通过水力学模型试验和数值模拟验证进/出水口设计的合理性。模型试验按重力相似准则设计<sup>[7]</sup>, 模型比尺1:40; 上游库区取11m宽, 13.5m长, 模拟隧洞长大于10倍洞径, 总体布置见图6所示。数值模拟采用恒定流计算得到流场的恒定解, 用控制体积法对偏微分方程组进行离散, 数值模拟模型网格示意图见图7所示。



图5 上库进出水口体型

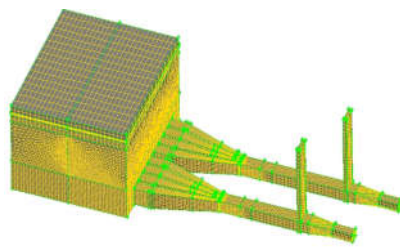


图6 上库计算区域网格示意图

试验发现,在发电工况,库水位高于2240.0m时,上库区水面平静,流态良好,各机组进口无旋涡产生;库水位在2240.0m~2237.0m时,库区1#孔~8#孔门槽上方有间歇性初生漩涡发生,漩涡表面最大直径在1.5m左右,见图8(a);库水位在2237.0m时,防涡梁上方出现

间歇性初生漩涡,见图8(b)。在抽水工况,库水位为2239.0m以上时,上库库区水面平静,流态良好,各机组进口无旋涡产生;库水位在2239m~2237.0m时,在出水口正前方的水面有轻微的水滚现象,见图8(c)。



(a) 发电工况: 2239m

(b) 发电工况: 2237m

(c) 抽水工况: 2237m

图7 进出水口流态图

对特征断面计算流速值与试验流速值比较分析,图9为死水位发电工况时,各流道门槽断面垂线流速与水深的关系图。可以看出,在同一断面,模拟值和试验值流

速分布具有相似性,均为沿水深方向先缓慢增大,后逐渐减小的趋势。可见,模拟值与试验值吻合较好。

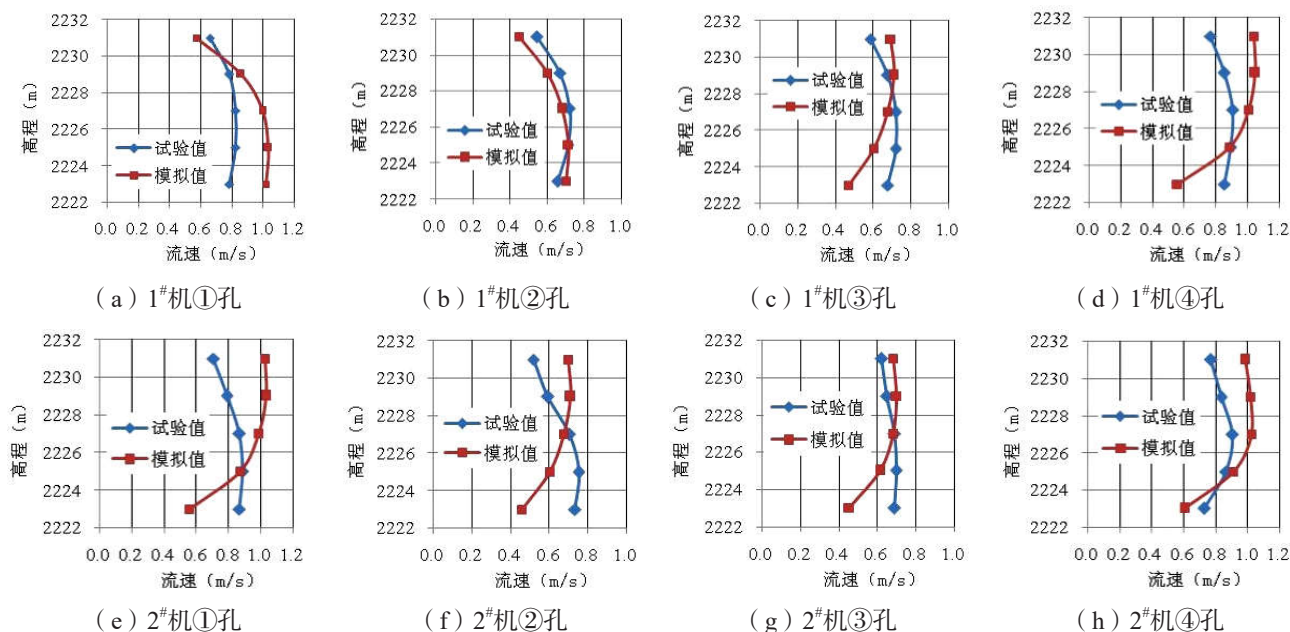


图8 发电工况各流道门槽断面流速分布图

在发电工况下,流速分布不均匀系数均不超过1.37,流速沿水深方向分布较为均匀;最大流速1.15m/s;各进/出水口4孔中流量分配较均匀,各孔流量比同4孔均匀过流对应的流量比对比,偏差均未超过5%,两侧孔口流量稍大于中间2孔流量。结果表明,两种运行工况下,上库1#和2#进/出水口水流流态平稳,没有发现回流、脱流等不利流态,说明上库进/出水口的平面扩散角、仰角、分流墩、防涡梁的参数是合理的,可以验证使用集成系统设计抽水蓄能电站输水发电系统的合理性与准确性。

#### 4 结论

本文主要介绍了抽水蓄能电站输水系统智能设计集成系统的开发与工程应用,通过工程案例与水力学模型试验与数值计算结果验证了开发系统的可行性与合理性。

(1)集成设计系统是利用C#编程语言开发的Windows系统应用程序,能够快速完成抽水蓄能电站输水系统的前期设计,极大程度地提高工程设计人员的设计效率。

(2)以新疆阜康抽水蓄能电站工程上水库进/出水口体型设计为例,通过参数化设计计算,得到了拦污栅孔口尺寸、最小淹没深度、进/出水口底板高程、防涡梁

段、扩散段、调整段和引水事故闸门井的体型参数。

(3)将参数化设计的体型参数通过试验和数值模拟进行验证,没有发现回流、脱流等不利流态,说明参数化设计的合理性。

#### 参考文献

- [1]漆江.抽水蓄能电站输水发电系统布置设计探讨[J].东北水利水电,2024,42(04):9-11+23.
- [2]周轩漾.浅谈我国抽水蓄能电站建设典型技术创新[J].电力勘测设计,2023,(S2):217-222.
- [3]刘海洋,刘洪里.大水位变幅混合式抽蓄电站水泵水轮机方案比选[J].人民黄河,2024,46(S1):177-178.
- [4]高昂,吴时强.抽水蓄能电站侧式进出水口体型及水力特性研究进展[J].南水北调与水利科技,2018,16(02):132-139.
- [5]张春生.抽水蓄能电站设计:全2册[M].中国电力出版社,2012.
- [6]水电站进水口设计规范:NB/T 10858-2021[S].北京:中国水利水电出版社,2022.
- [7]水利水电科学研究院,南京水利科学研究院.水工模型试验[M].北京:水利电力出版社,1985.