

ICS 27.140
CCS P 59

团 体 标 准

T/CSHE XXXX—YYYY

抽水蓄能电站进/出水口 水力学数值模拟及模型试验规程

Code for the hydraulic numerical simulation and model experiment of inlet/outlet
of pumped storage power stations

（征求意见稿）

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

中国水力发电工程学会 发布

目 次

前 言.....	II
引 言.....	III
1 范围.....	4
2 规范性引用文件.....	4
3 术语和定义.....	4
4 总体要求.....	5
5 水力学数值模拟.....	5
5.1 控制方程及离散方法.....	5
5.2 紊流模拟方法.....	5
5.3 侧式进/出水口模拟范围及边界条件.....	5
5.4 竖井式进/出水口模拟范围及边界条件.....	6
5.5 网格划分.....	6
5.6 数值模拟方法验证.....	7
5.7 计算工况.....	7
5.8 设计方案数值模拟结果与分析.....	7
5.9 优化方案数值模拟结果与分析.....	10
5.10 推荐方案数值模拟结果与分析.....	10
5.11 数值模拟研究报告.....	10
6 水力学模型试验.....	11
6.1 模型相似准则与模型几何比尺.....	11
6.2 侧式进/出水口模拟范围及模型边界.....	11
6.3 竖井式进/出水口模拟范围及边界条件.....	12
6.4 模型制作与安装.....	12
6.5 试验量测方法.....	12
6.6 试验工况.....	15
6.7 模型试验结果与分析.....	15
6.8 模型试验报告.....	15
附 录 A （资料性） 进/出水口水头损失量测.....	17
附 录 B （资料性） 进/出水口拦污栅断面流速分布.....	19
附 录 C （资料性） 进/出水口孔口流量分配.....	23
附 录 D （资料性） 进/出水口模型雷诺数和韦伯数.....	24

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国水力发电工程学会提出。

本文件由中国水力发电工程学会归口。

本文件起草单位：天津大学，中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司，水电水利规划设计总院，中国水利水电科学研究院，南京水利科学研究院，中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司，广东省水利电力勘测设计研究院有限公司，中国能源建设集团广西电力设计研究院有限公司

本文件主要起草人：高学平 朱洪涛 钱玉英 宋蕊香 刘殷竹 陆冬生 刘超 李帅 柳海涛 李广宁 徐准 吴疆 周雄辉 吕海艳 胡玉植 顾莉 熊图耀 万利台

本文件技术内容审查人：孙双科 李世东 刘之平 吴时强 陈文学 张宏伟 王均星 尹进步 刘亚坤 刘昭伟 叶茂 蒋逵超 丁新潮 王立杰 韩松林

引 言

抽水蓄能电站进/出水口是建于上、下水库内用于控制输水系统水流的工程设施，主要有侧式进/出水口和竖井式进/出水口两种型式。抽水蓄能电站具有抽水和发电两种运行工况，进/出水口水流方向是进流和出流双向的，进/出水口体型需适应双向流动，内部结构复杂且精细，其形状对双向流动均影响较大。良好的进/出水口对保障库区流态、避免有害漩涡、降低拦污栅振动损坏、减少水头损失等具有显著的作用。进/出水口是输水系统设计的关键环节，抽水蓄能电站设计规范对进/出水口水力学条件提出了严格的要求。进/出水口内部结构复杂，部分进/出水口连接隧洞具有纵坡较大、平面转弯、立面转弯等复杂布置形式，导致出流工况隧洞和进/出水口内部流动极其复杂且拦污栅断面容易出现反向流速；内部多个流道布置，易造成各流道流量分配不均。因此，对于初拟的进/出水口体型应通过数值模拟方法或模型试验方法进行水力学研究，以确保较优的进/出水口方案，为抽水蓄能电站安全运行提供保障。

利用数值模拟方法和模型试验方法进行进/出水口水力学研究时，紊流模型选择不合适、网格划分不当、边壁处理方法不合理、模拟范围不够大、边界进流和出流不符合实际情况、量测仪器精度不够、流速测点过少等，会导致出现不正确的研究结果，限制甚至误导了进/出水口优化设计。本文件旨在规定开展抽水蓄能电站进/出水口水力学数值模拟及模型试验的基本要求。

抽水蓄能电站进/出水口 水力学数值模拟及模型试验规程

1 范围

本文件规定了抽水蓄能电站进/出水口水力学数值模拟及模型试验的技术要求。

本文件适用于抽水蓄能电站侧式和竖井式进/出水口水力学数值模拟和模型试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

NB/T 10072-2018 抽水蓄能电站设计规范

NB/T 10858—2021 水电站进水口设计规范

SL155-2012 水工（常规）模型试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

进流工况 inflow condition

发电工况时上水库进/出水口为进水口，抽水工况时下水库进/出水口为进水口，对应进流工况。

3.2

出流工况 outflow condition

抽水工况时上水库进/出水口为出水口，发电工况时下水库进/出水口为出水口，对应出流工况。

3.3

进/出水口水头损失 head loss of inlet/outlet

侧式进/出水口水头损失包括防涡梁段、调整段、扩散段、渐变段等部位的水头损失。竖井式进/出水口水头损失包括库区孔口段、竖井扩散段、竖井直管段、弯管段、渐变段等部位的水头损失。应分别研究出流工况和进流工况的进/出水口水头损失。

3.4

进/出水口水头损失系数 head loss coefficient of inlet/outlet

进/出水口水头损失系数等于其水头损失除以输水隧洞流速水头。

3.5

流速分布不均匀系数 **uniformity coefficient of velocity distribution**

拦污栅断面流速的最大值与平均值之比，用于表征拦污栅断面流速分布的均匀程度。

3.6

流量分配不均匀系数 **uniformity coefficient of flow distribution**

单个孔口的实际流量与各孔口平均分流流量的比值，用于表征各孔口流量分配的均匀程度。

4 总体要求

4.1 开展抽水蓄能电站进/出水口水力学数值模拟或模型试验前，**应**获取抽水蓄能电站工程平面布置图、输水系统纵剖面图、进/出水口体型图、水库特征水位、抽水蓄能电站运行流量、进/出水口及隧洞糙率等相关资料以及任务书。

4.2 在工程可行性研究阶段应开展数值模拟研究；在工程招标详图阶段宜开展模型试验研究；对重要的或条件复杂的工程应开展模型试验研究，建议开展平行研究。

4.3 开展抽水蓄能电站进/出水口水力学数值模拟或模型试验前，**应**按照任务书要求，明确水力特性研究内容，编制研究大纲。

4.4 进/出水口水力特性**应**包括进/出水口水头损失、拦污栅断面流速分布、孔口流量分配等。

4.5 进/出水口附近库区水力特性**应**包括进/出水口漩涡、进/出水口附近库区环流、进/出水口附近库区表面流速分布、沿水深流速分布等。

4.6 进/出水口水力学数值模拟研究**宜**包括数值模拟方法选定、数值模拟方法验证、模拟范围及边界条件确定、设计方案数值模拟、优化方案数值模拟、推荐方案数值模拟、成果分析、结论与建议等内容，提出研究报告。

4.7 进/出水口水力学模型试验研究**宜**包括模型设计、模型制作、模型调试、设计方案模型试验、优化方案模型试验、推荐方案模型试验、成果分析、结论与建议等内容，提出研究报告。

5 水力学数值模拟

5.1 控制方程及离散方法

5.1.1 控制方程包括连续性方程和运动方程。

5.1.2 数值离散方法可采用有限体积法、有限差分法等。

5.2 紊流模拟方法

5.2.1 根据工程的特点，抽水蓄能电站进/出水口水力学数值模拟可采用雷诺平均模拟、分离涡模拟、大涡模拟等方法。

5.2.2 采用雷诺平均模拟方法时，根据实际研究对象，可选用标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 、Realizable $k-\varepsilon$ 、SST- $k-w$ 、雷诺应力模型等紊流模型。

5.3 侧式进/出水口模拟范围及边界条件

- 5.3.1 模拟范围**应**包括部分库区、反坡明渠、侧式进/出水口及部分隧洞。
- 5.3.2 当库区较小时，应模拟整个库区。
- 5.3.3 当进/出水口附近有大坝、残留围堰等时，**应**模拟这些建筑物。
- 5.3.4 当库区较规则且水域开阔时，侧式进/出水口前方及两侧的模拟范围均**应**大于 5 倍侧式进/出水口总宽度，这些模拟范围的边界作为库区边界。
- 5.3.5 当库区为河道型时，侧式进/出水口前方的模拟范围**应**包括河道对岸，两侧的模拟范围均**应**大于 5 倍侧式进/出水口总宽度，两侧模拟的范围边界作为库区边界。
- 5.3.6 当闸门井与侧式进/出水口间距离大于 20 倍输水隧洞直径时，可不模拟闸门井，隧洞模拟范围**应**大于 20 倍输水隧洞直径，该隧洞末端作为隧洞边界。
- 5.3.7 当闸门井与侧式进/出水口间距离小于 20 倍输水隧洞直径时，应模拟闸门井，闸门井以外隧洞模拟范围**应**大于 20 倍输水隧洞直径，该隧洞末端作为隧洞边界。
- 5.3.8 当立面转弯、平面转弯等复杂型式的隧洞与侧式进/出水口间距离小于 20 倍输水隧洞直径时，模拟范围**应**包括这些复杂型式的隧洞，转弯以外隧洞的模拟范围**应**大于 20 倍输水隧洞直径，该转弯以外隧洞末端作为隧洞边界。
- 5.3.9 库区边界，**应**设定水位按静水压强规律给出该边界断面的压强分布。
- 5.3.10 隧洞边界，**应**设定流量给出该边界断面的平均流速。
- 5.3.11 固壁边界**应**采用无滑移条件，自由液面可按刚盖假定或 VOF 法处理。
- 5.4 竖井式进/出水口模拟范围及边界条件
- 5.4.1 模拟范围**应**包括部分库区、竖井式进/出水口及部分隧洞。
- 5.4.2 当竖井式进/出水口离库岸较近时，应模拟库岸和部分水域，该部分水域的边界与竖井式进/出水口孔口的距离**应**大于顶盖直径的 12 倍，该部分水域的边界作为库区边界。
- 5.4.3 当竖井式进/出水口离库岸较远时，应模拟竖井式进/出水口四周的部分水域，该部分水域的边界与竖井式进/出水口孔口的距离**应**大于顶盖直径的 12 倍，该部分水域的边界作为库区边界。
- 5.4.4 当闸门井与竖井式进/出水口弯管段间距离大于 20 倍输水隧洞直径时，竖井式进/出水口弯管段以外隧洞模拟范围**应**大于 20 倍输水隧洞直径，该隧洞末端作为隧洞边界。
- 5.4.5 当闸门井与竖井式进/出水口弯管段间距离小于 20 倍输水隧洞直径时，**应**模拟闸门井，闸门井以外隧洞模拟范围**应**大于 20 倍输水隧洞直径，该闸门井以外隧洞末端作为隧洞边界。
- 5.4.6 库区边界，**应**设定水位按静水压强规律给出该边界断面的压强分布。
- 5.4.7 隧洞边界，**应**设定流量给出该边界断面的平均流速。
- 5.4.8 固壁边界**应**采用无滑移条件，自由液面可按刚盖假定或 VOF 法处理。
- 5.5 网格划分
- 5.5.1 网格划分**可**采用结构化网格、非结构化网格、结构化与非结构化相结合的混合网格，网格疏密

变化比率不宜超过 1.2。

5.5.2 侧式进/出水口扩散段始端分流隔墙处应进行局部加密。

5.5.3 竖井式进/出水口应在孔口拦污栅断面附近、竖井扩散段、弯管段进行局部加密。

5.5.4 数值模拟应进行网格尺度无关性检验，直至拦污栅断面流速分布基本相同。

5.6 数值模拟方法验证

5.6.1 数值模拟研究对象前，应选定一个和研究对象类似的进/出水口进行数值模拟方法验证。

5.6.2 验证的内容应包括拦污栅断面流速分布和孔口流量分配等。

5.7 计算工况

5.7.1 设计方案应对死水位条件下最大（满机）运行流量的发电工况和抽水工况进行计算，研究进/出水口及附近库区水力特性。

5.7.2 优化过程应对死水位条件下最大（满机）运行流量的发电工况和抽水工况进行计算，优化不满足要求的水力特性。

5.7.3 推荐方案计算应对死水位、正常蓄水位以及任务书指定的其它水位条件下不同运行流量的发电工况和抽水工况进行计算，全面研究进/出水口及附近库区水力特性。

5.8 设计方案数值模拟结果与分析

5.8.1 侧式进/出水口

5.8.1.1 侧式进/出水口水头损失。侧式进/出水口水头损失是指进/出水口附近库区断面（0-0）至进/出水口渐变段始端断面（1-1）间的水头损失。进/出水口附近库区断面宜取在明渠反坡末端断面，当无明显反坡时库区断面宜取在进/出水口前 1 倍进/出水口总宽度的位置。进/出水口渐变段始端断面宜取在距渐变段始端（无渐变段的应以扩散段始端算）1 倍输水隧洞直径（或宽度）的隧洞断面。进流工况进/出水口水头损失按照公式（1）计算。出流工况进/出水口水头损失按照公式（2）计算。侧式进/出水口水头损失系数按照公式（3）计算。侧式进/出水口水头损失系数，进流工况宜小于 0.3，出流工况宜小于 0.4，否则需进一步优化。

$$h_{0-1} = \left(z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} \right) - \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (1)$$

$$h_{1-0} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} \right) \quad (2)$$

式中：

h_{0-1} ——进流工况进/出水口水头损失；

h_{1-0} ——出流工况进/出水口水头损失；

z_0 ——0-0 断面水面位置；

p_0 ——0-0 断面水面压强；

v_0 ——0-0 断面平均流速；

α_0 ——动能修正系数，取 1.0；

z_1 ——1-1 断面中心点位置；

p_1 ——1-1 断面中心点压强；

v_1 ——1-1 断面平均流速；

α_1 ——动能修正系数，取 1.0；

g ——重力加速度。

$$\xi = h_j / (v^2 / 2g) \quad (3)$$

式中：

ξ ——水头损失系数；

h_j ——水头损失，脚标 j 代表 0-1 或 1-0；

$v^2 / 2g$ ——输水隧洞流速水头；

g ——重力加速度。

5.8.1.2 闸门井段水头损失。当有闸门井时，应单独计算闸门井段水头损失。闸门井段水头损失是指闸门井段的水库侧 1 倍隧洞直径（或宽度）的隧洞断面（2-2）至闸门井段的隧洞侧 1 倍隧洞直径（或宽度）的隧洞断面（3-3）间的水头损失。进流工况闸门井段水头损失按照公式（4）计算。出流工况闸门井段水头损失按照公式（5）计算。闸门井段水头损失系数按照公式（3）计算，但脚标 j 代表 2-3 或 3-2。

$$h_{2-3} = (z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g}) - (z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2g}) \quad (4)$$

$$h_{3-2} = (z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2g}) - (z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g}) \quad (5)$$

式中：

h_{2-3} ——进流工况闸门井段水头损失；

h_{3-2} ——出流工况闸门井段水头损失；

z_2 ——2-2 断面中心位置；

p_2 ——2-2 断面中心压强；

v_2 ——2-2 断面平均流速；

α_2 ——动能修正系数，取 1.0；

z_3 ——3-3 断面中心点位置；

p_3 ——3-3 断面中心点压强；

v_3 ——3-3 断面平均流速；

α_3 ——动能修正系数，取 1.0；

g ——重力加速度。

5.8.1.3 侧式进/出水口拦污栅断面流速分布。每个孔口拦污栅断面布置左、中、右 3 条垂线，提取这些垂线的流速，绘制拦污栅断面流速分布。提出每个孔口的最大流速和平均流速，计算其流速分布不均匀系数 C_v 。流速分布不均匀系数按照公式（6）计算。侧式进/出水口拦污栅断面流速分布不均匀系数，进流工况宜小于 1.5，出流工况应小于 2，否则需进一步优化。

$$C_v = \frac{v_{\max}}{\bar{v}} \quad (6)$$

式中：

C_v ——流速分布不均匀系数；

v_{\max} ——最大流速；

\bar{v} ——平均流速。

5.8.1.4 侧式进/出水口流量分配。提取各孔口的流量，计算各孔口流量分配不均匀系数。孔口流量分配不均匀系数按照公式（7）计算。各孔口流量分配不均匀系数，进流工况和出流工况均宜在 0.9~1.1 范围，否则需进一步优化。

$$C_Q = \frac{Q_r}{Q_m} \quad (7)$$

式中：

C_Q ——孔口流量分配不均匀系数；

Q_r ——单个孔口的实际流量（数值模拟得到的流量）；

Q_m ——各孔口平均分流量（总流量/孔口数）。

5.8.2 竖井式进/出水口

5.8.2.1 竖井式进/出水口水头损失。竖井式进/出水口水头损失是指进/出水口附近库区断面（0-0）至竖井式进/出水口渐变段始端（无渐变段的以弯管段始端）断面（1-1）间的水头损失。进/出水口附近库区断面宜取在进/出水口孔口前 2 倍顶盖直径距离的位置。竖井式进/出水口渐变段始端宜取在距渐变段始端以外 1 倍输水隧洞直径的隧洞断面。竖井式进/出水口水头损失及水头损失系数与侧式进/出水口的计算公式相同。竖井式进/出水口水头损失系数，进流工况宜小于 0.5，出流工况宜小于 0.6，否则进一步优化。

5.8.2.2 闸门井段水头损失。当有闸门井时，应单独计算闸门井段水头损失。计算方法见 5.8.1.2。

5.8.2.3 竖井式进/出水口拦污栅断面流速。每个孔口拦污栅断面布置左中右 3 条垂线，提取这些垂线的流速，绘制拦污栅断面流速分布。提取每个孔口的最大流速和平均流速，计算其流速分布不均匀系数 C_v 。流速分布不均匀系数按照公式（6）计算。进流工况，拦污栅断面流速分布不均匀系数宜小于 1.5；出流工况，允许孔口底部有反向流速，但其反向流速范围应小于孔口高度的 20%，其拦污栅流速分布不均匀系数 C_v 建议小于 3.0 但可适当放宽。

5.8.2.4 竖井式进/出水口流量分配。提取各孔口的流量，计算各孔口流量分配不均匀系数。孔口流量分配不均匀系数按照公式（5）计算。各孔口流量分配不均匀系数，出流工况和进流工况均宜在 0.9~1.1 范围，否则需进一步优化。

5.8.2.5 应判断竖井式进/出水口之间是否相互影响，比较死水位条件下最大流量运行时单个进/出水口运行和两个进/出水口同时运行时各孔口拦污栅断面流速分布，其流速分布基本相同时可认为不相互影响。

5.9 优化方案数值模拟结果与分析

5.9.1 设计方案进/出水口水力特性不满足要求时，应进行优化。

5.9.2 侧式进/出水口拦污栅断面流速分布不均匀时，可通过增加调整段、调整扩散段顶板扩张角、扩散段水平扩散角、扩散段底板坡度等来改善拦污栅断面流速分布。

5.9.3 侧式进/出水口各孔道流量分配不均匀时，可通过调整扩散段始端分流隔墙的中边孔道宽度比、中间隔墙缩进距离、输水隧洞布置方式等来改善各孔道的流量分配。

5.9.4 竖井式进/出水口拦污栅断面反向流速范围超过孔口高度的 20%时，可通过降低竖井式进/出水口孔口高度或调整竖井扩散段边界曲线来降低拦污栅断面反向流速的范围。

5.9.5 竖井式进/出水口各孔口流量分配不满足要求时，可调整弯管段转弯半径来改善各孔口流量分配不均匀系数。弯管段可采用肘型弯管、等宽渐变弯管、等直径 S 弯管等型式。

5.9.6 当进流工况发生漩涡时，可通过调整防涡梁间距及个数、改善来流条件、增加淹没水深等措施。

5.10 推荐方案数值模拟结果与分析

5.10.1 应对推荐方案进行全面数值模拟研究。

5.10.2 计算死水位、正常蓄水位以及任务书指定的其它水位条件下不同运行流量的发电工况和抽水工况的进/出水口及附近库区水力特性。应包括进/出水口水头损失、拦污栅断面流速分布、孔口流量分配、进/出水口漩涡、进/出水口附近库区环流、进/出水口附近库区表面流速分布、沿水深流速分布等。

5.11 数值模拟研究报告

数值模拟研究报告宜包括下列内容：

- a) 摘要
- b) 工程概况及研究内容；
- c) 数值模拟方法及验证；
- d) 模拟范围及边界条件；
- e) 设计方案数值模拟结果与分析；
- f) 优化方案数值模拟结果与分析；
- g) 推荐方案数值模拟结果与分析；
- h) 结论与建议；

i) 参考文献。

6 水力学模型试验

6.1 模型相似准则与模型几何比尺

6.1.1 进/出水口水流运动主要受重力作用，模型**应**按照重力相似准则设计，采用正态模型，保证几何边界与原型相似。

6.1.2 模型几何比尺，**应**综合考虑试验内容、库区地形、进/出水口布置形式、输水隧洞直径、流量等。模型几何比尺（原型量与模型量的比值）宜小于 45。

6.1.3 应进行模型流态校核，计算模型输水隧洞的雷诺数，保证和原型流态一致。

6.1.4 为减免模拟漩涡的模型比尺效应，应尽量使模型雷诺数和韦伯数超过一定的临界值，模型雷诺数临界值为 34000，模型韦伯数临界值为 120。当雷诺数和韦伯数未超过相应临界值时，试验时一般采用加大流量的办法对漩涡运动进行补充观察。加大流量的倍数应通过计算雷诺数和韦伯数满足相应临界值得到，但加大流量的倍数不宜超过 3.5 倍，否则应减小模型几何比尺重新设计模型。雷诺数 Re 按公式（8）计算。韦伯数 We 按公式（9）计算。

$$Re = \frac{Q}{\nu s} \quad (8)$$

式中：

Q ——流量；

ν ——液体运动黏滞系数；

s ——孔口中心淹没深度。

$$We = \frac{\rho v^2 H}{\sigma} \quad (9)$$

式中：

ρ ——液体密度；

H ——孔口高度；

σ ——液体表面张力系数；

v ——孔口平均流速。

6.2 侧式进/出水口模拟范围及模型边界

6.2.1 模拟范围**应**包括部分库区、侧式进/出水口、反坡明渠及部分隧洞。

6.2.2 当侧式进/出水口附近有大坝、残留围堰等时，应模拟这些建筑物。

6.2.3 当库区较规则且水域开阔时，侧式进/出水口前方及两侧的模拟范围均**应**大于 5 倍侧式进/出水口总宽度，这些模拟范围的边界作为库区边界。

6.2.4 当库区为河道型时，侧式进/出水口前方**应**模拟至河道对岸，两侧的模拟范围均**应**大于 5 倍侧式进/出水口总宽度，两侧的模拟范围边界作为库区边界。

6.2.5 当闸门井与侧式进/出水口间距离大于 20 倍输水隧洞直径时，可不模拟闸门井，隧洞模拟范围应大于 20 倍输水隧洞直径，该隧洞末端作为隧洞边界。

6.2.6 当闸门井与侧式进/出水口间距离小于 20 倍输水隧洞直径时，应模拟闸门井，闸门井以外隧洞模拟范围应大于 20 倍输水隧洞直径，该隧洞末端作为隧洞边界。

6.2.7 当立面转弯、平面转弯等复杂型式的隧洞与侧式进/出水口间距离小于 20 倍输水隧洞直径时，应模拟这些复杂型式的隧洞，转弯以外隧洞的模拟范围应大于 20 倍输水隧洞直径，该转弯以外的隧洞末端作为隧洞边界。

6.3 竖井式进/出水口模拟范围及模型边界

6.3.1 模拟范围应包括部分库区、竖井式进/出水口及部分隧洞。

6.3.2 当竖井式进/出水口离库岸较近时，应模拟库岸及部分开阔水域，开阔水域边界与竖井式进/出水口孔口的距离应大于顶盖直径的 12 倍，该开阔水域边界作为库区边界。

6.3.3 当竖井式进/出水口离库岸较远时，应模拟进/出水口四周的开阔水域，该开阔水域边界与竖井式进/出水口孔口的距离应大于顶盖直径的 12 倍，该开阔水域边界作为库区边界。

6.3.4 当闸门井与竖井式进/出水口弯管段间距离大于 20 倍输水隧洞直径时，可不模拟闸门井，竖井式进/出水口弯管段以外隧洞模拟范围应大于 20 倍输水隧洞直径，该隧洞末端作为隧洞边界。

6.3.5 当闸门井与竖井式进/出水口弯管段间距离小于 20 倍输水隧洞直径时，应模拟闸门井，闸门井以外隧洞模拟范围应大于 20 倍输水隧洞直径，该闸门井以外隧洞末端作为隧洞边界。

6.4 模型制作与安装

6.4.1 进/出水口及隧洞宜采用有机玻璃制作。

6.4.2 库区地形宜采用水泥砂浆抹面。

6.4.3 进/出水口有机玻璃模型制作误差宜小于 0.1mm。库区地形模型制作误差、模型安装精度等应按 SL155-2012 水工(常规)模型试验规程执行。

6.4.4 模型隧洞边界的水流应不连接管道的影响，隧洞边界应再接一段与模型隧洞等直径的直管作为过渡段来调整水流，该过渡段应大于 10 倍管径的长度。

6.4.5 流量的量测和控制，宜在与隧洞边界连接的过渡段以外设置控制阀和流量量测仪器。

6.4.6 库区边界的进流或出流应不影响进/出水口附近库区的流动，该库区边界应设置整流装置确保进流和出流符合实际情况。

6.4.7 库区水位量测，侧式进/出水口库区水位量测点应设置在明渠反坡末端断面（当无明渠反坡时应设置在进/出水口前 1 倍进/出水口总宽度位置的断面）；竖井式进/出水口库区水位量测点应设置在竖井式进/出水口孔口前 2 倍顶盖直径距离位置的断面。

6.5 试验量测方法

6.5.1 水头损失量测

6.5.1.1 应分别进行出流工况和进流工况水头损失的量测。

6.5.1.2 侧式进/出水口水头损失的量测断面同 5.8.1.1 数值模拟选定的进/出水口附近库区断面（0-0）和进/出水口渐变段始端断面（1-1）。

6.5.1.3 竖井式进/出水口水头损失的量测断面同 5.8.2.1 数值模拟选定的进/出水口附近库区断面（0-0）和竖井式进/出水口渐变段始端断面（1-1）。

6.5.1.4 在一定库水位和流量条件下，量测选定断面的测压管水位，得出进/出水口水头损失。量测断面测压管水位，宜应采取沿断面四周 4 点平均值。

6.5.1.5 进流工况进/出水口水头损失按照公式（10）计算。出流工况进/出水口水头损失按照公式（11）计算。进/出水口水头损失系数按照公式（3）计算。

$$h_{0-1} = \left(\nabla_0 + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} \right) - \left(\nabla_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (10)$$

$$h_{1-0} = \left(\nabla_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(\nabla_0 + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} \right) \quad (11)$$

式中：

h_{0-1} ——进流工况进/出水口水头损失；

h_{1-0} ——出流工况进/出水口水头损失；

∇_0 ——0-0 断面的测压管水位；

v_0 ——0-0 断面平均流速，一般取 0；

α_0 ——动能修正系数，取 1.0；

∇_1 ——1-1 断面的测压管水位；

v_1 ——1-1 断面平均流速；

α_1 ——动能修正系数，取 1.0；

g ——重力加速度。

6.5.1.6 当有闸门井时，应单独量测闸门井段水头损失，并给出闸门井段水头损失系数。闸门井水头损失量测断面同 5.8.1.2 数值模拟选定的断面。进流工况闸门井段水头损失按照公式（12）计算。出流工况闸门井段水头损失按照公式（13）计算。闸门井段水头损失系数按照公式（3）计算，但脚标 j 代表 2-3 或 3-2。

$$h_{2-3} = \left(\nabla_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(\nabla_3 + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2g} \right) \quad (12)$$

$$h_{3-2} = \left(\nabla_3 + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2g} \right) - \left(\nabla_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (13)$$

式中：

h_{2-3} ——进流工况闸门井段水头损失；

h_{3-2} ——出流工况闸门井段水头损失；

∇_2 ——2-2 断面的测压管水位；

v_2 ——2-2 断面平均流速；

α_2 ——动能修正系数，取 1.0；

∇_3 ——3-3 断面的测压管水位；

v_3 ——3-3 断面平均流速；

α_3 ——动能修正系数，取 1.0；

g ——重力加速度。

6.5.1.7 试验时，应进行不同流量的进/出水口水头损失的测量，这些流量应涵盖电站的不同运行流量，可从小流量至大流量或反之，至少 5 个流量，得到相应的水头损失及水头损失系数，画出输水隧洞流速水头~水头损失系数关系，这些点均应接近一条水平直线，说明水头损失不随流量变化（与雷诺数无关）其流动达到了紊流粗糙区。

6.5.2 流速量测

6.5.2.1 侧式进/出水口每个孔口的拦污栅断面应布置左中右 3 条垂线、每条垂线上测点应不少于 5 个点，对于出流工况垂线上测点数应增加，这些增加的测点应能得到最大流速和可能的反向流速，列表给出量测结果，绘制拦污栅断面流速分布，得到每个孔口的最大流速、平均流速及流速分布不均匀系数 C_v 。

6.5.2.2 竖井式进/出水口每个孔口拦污栅断面布置左中右 3 条垂线、每条垂线上的测点应不少于 5 个点，对于出流工况垂线上的测点数应增加，孔口底部小于孔口高度 20% 范围内应至少增加 2 个测点以获得可能的反向流速，孔口中上部主流范围应增加测点以便得到最大流速，列表给出量测结果，绘制拦污栅断面流速分布，得到每个孔口的最大流速、平均流速及流速分布不均匀系数 C_v 。

6.5.2.3 进/出水口拦污栅断面流速量测应采用具有测量流速方向及近孔口底部流速功能的流速仪。

6.5.2.4 侧式进/出水口反坡明渠段内及附近库区的流速分布，可仅对死水位条件下最大运行流量的发电工况和抽水工况进行试验。宜沿反坡明渠纵向布置不少于 3 个典型断面，每个断面沿横向不少于 5 个测点，每个测点的垂线上应布置不少于 3 个测点；明渠以外库区（明渠正对的库区及两侧库区）应视情况布置相应断面及测点。量测每个测点流速，列表给出流速结果，绘制流速分布。

6.5.2.5 竖井式进/出水口附近流速分布，可仅对死水位条件下最大运行流量的发电工况和抽水工况进行试验。宜以顶盖为中心环形布置测点，至少布置 3 个环形，第 1 环形距孔口 10m，其余环形间隔 10m，沿环形布置测点，测点数等于孔口数，测点正对每个孔口中心布置；再沿每测点做垂线并布置上中下 3 个测点。量测每个测点流速，列表给出流速结果，绘制环形的流速分布及沿水深的流速分布。

6.5.3 漩涡观测

6.5.3.1 试验工况为死水位进流工况。

6.5.3.2 按设计流量进行试验，观测进/出水口是否发生漩涡以及漩涡情况。

6.5.3.3 按模型雷诺数和韦伯数满足相应临界值得出的加大流量倍数的流量进行试验，观测进/出水口是否发生漩涡以及漩涡情况。

6.5.4 录像与拍照

6.5.4.1 试验过程中，应对典型试验工况进行录像和拍照。

6.5.4.2 编辑典型试验视频及照片，视频应有字幕或解说，照片应有文字说明。

6.6 试验工况

6.6.1 设计方案应对死水位条件下最大（满机）运行流量的发电工况和抽水工况进行试验，观测进/出水口及附近库区水力特性。

6.6.2 优化过程应对死水位条件下最大（满机）运行流量的发电工况和抽水工况进行试验，优化不满足要求的水力特性。

6.6.3 推荐方案计算应对死水位、正常蓄水位以及任务书指定的其它水位条件下不运行流量的发电工况和抽水工况进行试验，全面观测进/出水口及附近库区水力特性。

6.7 模型试验结果与分析

6.7.1.1 进/出水口水头损失。侧式进/出水口水头损失系数，进流工况宜小于 0.3，出流工况宜小于 0.4；竖井式进/出水口水头损失系数，进流工况宜小于 0.5，出流工况宜小于 0.6。

6.7.2 进/出水口拦污栅断面流速分布。侧式进/出水口，其拦污栅断面流速分布不均匀系数，进流工况宜小于 1.5，出流工况应小于 2。竖井式进/出水口，进流工况拦污栅断面流速分布不均匀系数宜小于 1.5；出流工况，允许孔口底部有反向流速，但其反向流速范围应小于孔口高度的 20%，其拦污栅流速分布不均匀系数 C_v 建议小于 3.0，但可以适当放宽。

6.7.3 孔口流量分配。各孔口流量分配不均匀系数，进流工况和出流工况均宜在 0.9~1.1 范围。

6.7.4 进流工况漩涡。侧式进/出水口和竖井式进/出水口应不出现吸气漩涡。

6.7.5 应判断竖井式进/出水口之间是否存在相互影响，比较死水位条件下最大流量运行时单个进/出水口运行和两个进/出水口同时运行时各孔口拦污栅断面流速分布，基本无差异时可认为不相互影响。

6.7.6 进/出水口优化思路与数值模拟相同。

6.8 模型试验报告

模型试验报告宜包括下列内容：

- a) 摘要
- b) 工程概况及研究内容；
- c) 模型设计及制作；
- d) 设计方案试验结果与分析；
- e) 优化方案试验结果与分析；
- f) 推荐方案试验结果与分析；

- g) 结论与建议;
- h) 参考文献。

附录 A
(资料性)
进/出水口水头损失量测

侧式进/出水口水头损失可按表A.1列出，竖井式进/出水口水头损失可按表A.2列出。输水隧洞流速水头~水头损失关系可按图A.1绘出。

表A.1 侧式进/出水口水头损失

进/出水口 编号	模型				原型				水头损失 系数
	流量 (cm ³ /s)	输水隧洞 平均流速 (cm/s)	输水隧洞 流速水头 (cm)	水头损失 (cm)	流量 (m ³ /s)	输水隧洞 平均流速 (m/s)	输水隧洞 流速水头 (m)	水头损失 (m)	
1号									
1号进/出水口平均值									
2号									
2号进/出水口平均值									
进/出水口水头损失系数平均值									

表A.2 竖井式进/出水口水头损失

进/ 出水口 编号	模型					原型					水头损失 系数	
	流量 (cm ³ /s)	输水隧洞 平均 流速 (cm/s)	输水隧洞 流速 水头 (cm)	水头损失		流量 (m ³ /s)	输水隧洞 平均 流速 (m/s)	输水隧洞 流速 水头 (m)	水头损失			
				弯道段 (cm)	进/出 水口 (cm)				弯道 段 (m)	进/出 水口 (m)		
1号												
1号进/出水口水头损失系数平均值												
2号												
2号进/出水口水头损失系数平均值												

进/出水口 编号	模型					原型					水头损失系数		
	流量 (cm ³ /s)	输水隧洞平均 流速 (cm/s)	输水隧洞流速 水头 (cm)	水头损失		流量 (m ³ /s)	输水隧洞平均 流速 (m/s)	输水隧洞流速 水头 (m)	水头损失		弯道 段 (m)	进/ 出水口	
				弯道段 (cm)	进/出水口 (cm)				弯道 段 (m)	进/出水口 (m)			
	进/出水口水头损失系数平均值												

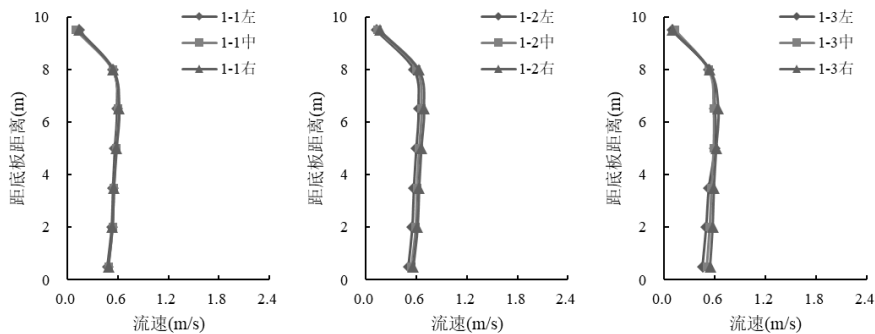
附录 B
(资料性)
进/出水口拦污栅断面流速分布

侧式进/出水口拦污栅断面流速分布，进流工况可按表B.1列出和图B.1绘出，出流工况可按表B.2列出和图B.2绘出。竖井式进/出水口拦污栅断面流速，进流工况可按表B.3列出和图B.3绘出，出流工况可按表B.4列出和图B.4绘出。

表B.1 出流工况侧式进/出水口拦污栅断面流速（1号进/出水口、2隔墙3孔口）

测点距孔口底板高度 (m) *	拦污栅断面流速 (m/s)								
	孔口1-1			孔口1-2			孔口1-3		
	1-1左	1-1中	1-1右	1-2左	1-2中	1-2右	1-3左	1-3中	1-3右
0.5									
2.0*									
3.5									
5.0*									
6.5									
8.0									
9.0									
孔口最大流速 (m/s)									
孔口平均流速 (m/s)									
流速分布不均匀系数									

*以孔口高度 9.6m 为例。距孔口底板高度 2.0m 和 5.0m 的测点视情况可以不测。

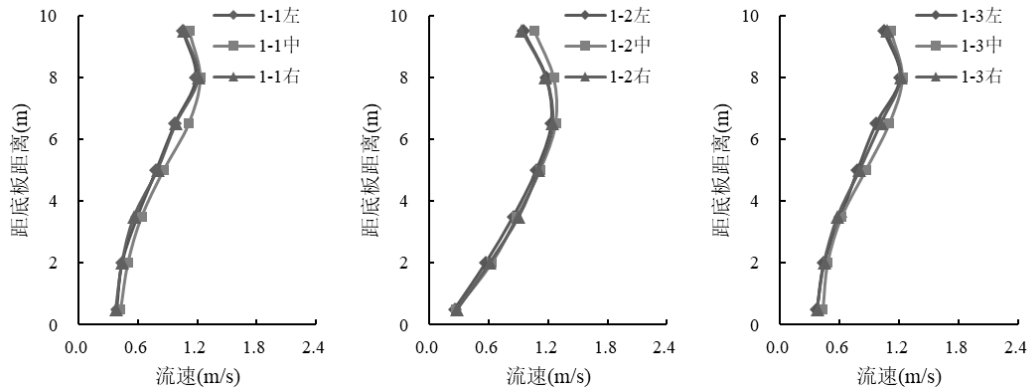


图B.1 进流工况 1号侧式进/出水口拦污栅断面流速分布

表B.2 出流工况侧式进/出水口拦污栅断面流速（1号进/出水口、2隔墙3孔口）

测点距孔口底板高度 (m) *	拦污栅断面流速 (m/s)								
	孔口1-1			孔口1-2			孔口1-3		
	1-1左	1-1中	1-1右	1-2左	1-2中	1-2右	1-3左	1-3中	1-3右
0.5									
2.0									
3.5									
5.0									
6.5									
8.0									
9.0									
孔口最大流速 (m/s)									
孔口平均流速 (m/s)									
流速分布不均匀系数									

*以孔口高度 9.6m 为例。

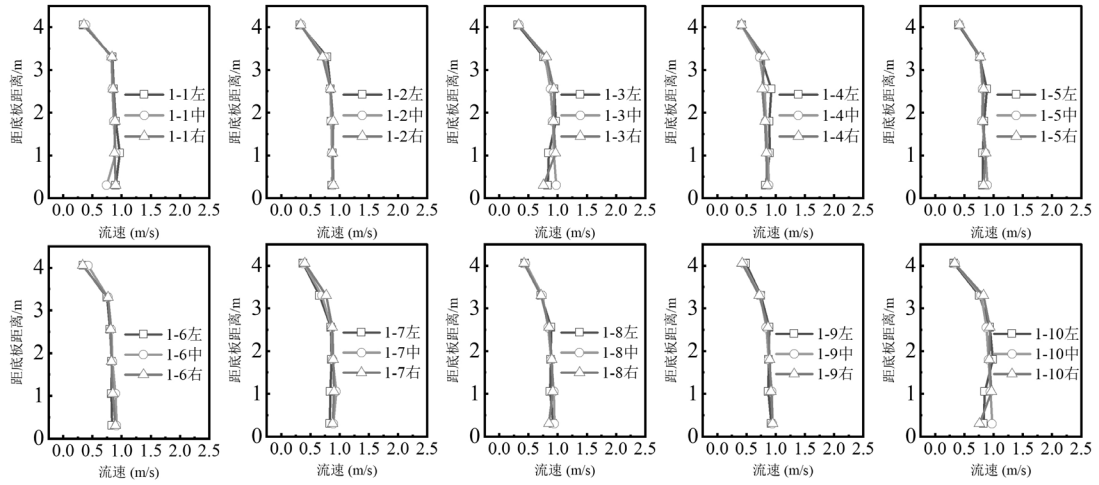


图B.2 出流工况 1 号侧式进/出水口拦污栅断面流速分布

表B.3 进流工况竖井式进/出水口拦污栅断面流速（1 号进/出水口、10 个孔口）

孔口 编号	测线 编号	测点距孔口底板高度 (m) *						孔口最大流速 (m/s)	孔口平均流速 (m/s)	流速分布 不均匀系数
		0.25	1.00	1.75	2.50	3.25	4.00			
1-1	1-1左									
	1-1中									
	1-1右									
1-2	1-2左									
	1-2中									
	1-2右									
1-3	1-3左									
	1-3中									
	1-3右									
1-4	1-4左									
	1-4中									
	1-4右									
1-5	1-5左									
	1-5中									
	1-5右									
1-6	1-6左									
	1-6中									
	1-6右									
1-7	1-7左									
	1-7中									
	1-7右									
1-8	1-8左									
	1-8中									
	1-8右									
1-9	1-9左									
	1-9中									
	1-9右									
1-10	1-10左									
	1-10中									
	1-10右									

*以孔口高度 4.3m 为例。

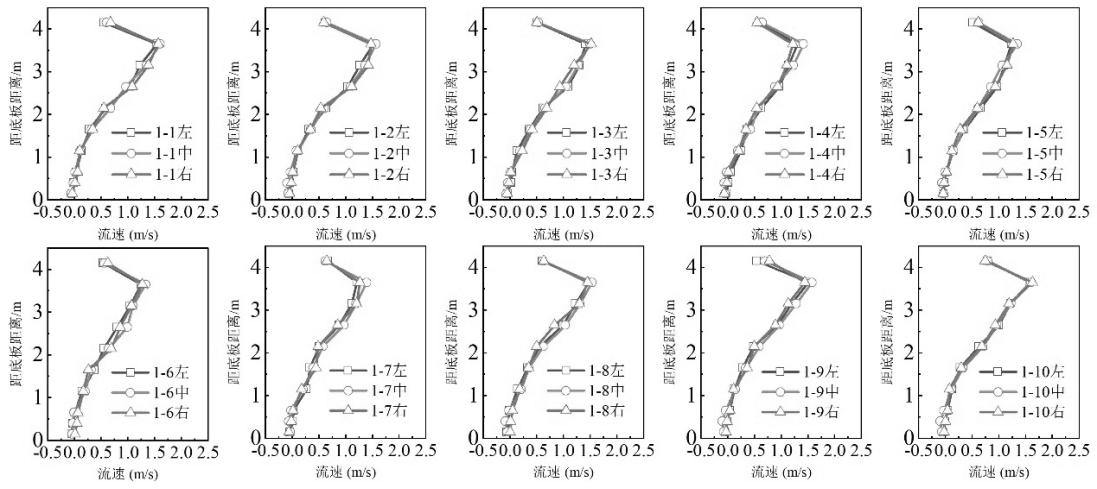


图B.3 进流工况 1 号竖井式进/出水口拦污栅断面流速分布

表B.4 出流工况竖井式进/出水口拦污栅断面流速（1 号进/出水口、10 个孔口）

孔口 编号	测线 编号	测点距孔口底板高度 (m) *										孔口最大流 速 (m/s)	孔口平均流 速 (m/s)	流速分布不 均匀系数		
		0.25	0.50	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25					
1-1	1-1左															
	1-1中															
	1-1右															
1-2	1-2左															
	1-2中															
	1-2右															
1-3	1-3左															
	1-3中															
	1-3右															
1-4	1-4左															
	1-4中															
	1-4右															
1-5	1-5左															
	1-5中															
	1-5右															
1-6	1-6左															
	1-6中															
	1-6右															
1-7	1-7左															
	1-7中															
	1-7右															
1-8	1-8左															
	1-8中															
	1-8右															
1-9	1-9左															
	1-9中															
	1-9右															
1-10	1-10左															
	1-10中															
	1-10右															

*以孔口高度 4.3m 为例。



图B.4 出流工况 1 号竖井式进/出水口拦污栅断面流速分布

附录 C
(资料性)
进/出水口孔口流量分配

侧式进/出水口孔口流量分配可按表C.1列出。竖井式进/出水口孔口流量分配可按表C.2列出。

表C.1 侧式进/出水口孔口流量分配 (1号进/出水口、3隔墙4孔口)

孔口编号	1-1	1-2	1-3	1-4
流量 (m ³ /s)				
流量分配 (%)				
流量分配不均匀系数				

表C.2 竖井式进/出水口孔口流量分配 (1号进/出水口、10个孔口)

孔口编号	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
流量 (m ³ /s)										
流量分配 (%)										
流量分配不均匀系数										

附录 D

(资料性)

进/出水口模型雷诺数和韦伯数

进/出水口模型雷诺数和韦伯数可按表D.1列出。

表D.1 进/出水口模型雷诺数和韦伯数

进流工况		原型值				模型值					
		流量 (m ³ /s)	孔口平均流速 (m/s)	孔口高度 (m)	孔口中心淹没深度 (m)	流量 (m ³ /s)	孔口平均流速 (m/s)	孔口高度 (m)	孔口中心淹没深度 (m)	<i>Re</i>	<i>We</i>
死水位	最大运行流量										
	1.5倍流量										
	2.0倍流量										
	2.5倍流量										
	3.0倍流量										