

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

编制说明

目 次

1 编制背景	1
2 编制主要原则	1
3 主要工作过程	1
4 标准结构和内容说明	2
5 相关标准对比说明	4
6 标准实施措施说明	5
7 支撑材料与分析	5

1 编制背景

本标准由天津大学等单位负责起草。

为实现“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”目标，在能源绿色低碳转型新形势下，加快发展抽水蓄能势在必行。截至2024年底我国抽水蓄能电站投产总装机容量达5869万kw（约50座），预计到2030年投产总规模1.3亿kw左右（约100座），到2060年投产总规模5亿kw左右（约400座），未来有数百座抽水蓄能电站进出水口设计及建设，抽水蓄能电站输水系统设计面临着新的挑战。

进/出水口是抽水蓄能电站输水系统的重要组成部分，主要有侧式进/出水口和竖井式进/出水口。进/出水口在营造库区良好水流条件、避免有害漩涡、降低拦污栅振动损坏、减少水头损失提高电站效率、节省建设成本、保障电站运行安全，以及协调复杂地形地质条件下输水隧洞布置等具有不可替代的作用。进/出水口体型复杂，为确保抽水蓄能电站运行安全和效率，《抽水蓄能电站设计规范》（NB/T10072-2018）和《水电站进水口设计规范》（NB/T 10858-2021）均对进/出水口水力学指标提出了明确要求。在抽水蓄能电站设计阶段应开展进/出水口水力数值计算和模型试验研究。

由于进/出水口体型复杂，对应抽水工况和发电工况既是进水口又是出水口，出流为扩散流动，进流为收缩流动，需满足双向流动的水力指标均较优的要求，较常规的单项流动相比更为复杂；同时进/出水口结构精细、尺度小、内部设隔墙分为多通道，因此对进/出水口水力学研究提出了更高的要求。但是，目前的进/出水口水力学研究经常得出不正确的结果，分析其原因，主要是进/出水口结构精细、尺度小、扩散收缩双向流动的特殊性对研究方法的高标准要求所致，表现为或者是研究方法不当，或者研究人员缺乏实践经验，或者研究人员不熟悉进/出水口水力特性，或者是研究区域不够大其边界影响了研究结果，以及其他各种原因。目前缺少用于指导相关研究人员开展抽水蓄能电站进/出水口水力学研究的相关规程。

因此，为了规范抽水蓄能电站进/出水口水力数值计算和模型试验研究，保证研究成果的准确性，特制定本规程。本规程对保证抽水蓄能电站进/出水口水力学研究成果的准确性，指导抽水蓄能电站进/出水口设计和优化具有重要意义。

2 编制主要原则

本规程基于科学性原则和实用性原则，可用于直接指导研究人员开展抽水蓄能电站进/出水口水力学数值模拟和水力学模型试验研究。

3 主要工作过程（包括前期工作、征求意见稿形成及发送情况、意见收集和处理情况、送审

草稿形成和专业委员会（或分会）审查情况、送审初稿形成和送管理委员会审查情况、提出报批稿报批情况）

2025年4月2日，起草单位于向中国水力发电工程协会提交了立项申请表。

2025年4月22日，中国水力发电工程学会《以下简称学会》委托水工水力学专业委员会在北京组织召开了《抽水蓄能电站进/出水口水力数值计算及模型试验规程》标准立项审查会。参加审查的有来自中国水力发电工程学会、水工水力学专业委员会、中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、武汉大学、西北农林科技大学、大连理工大学、中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司和中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司等单位的专家共11人。参加会议的还有标准申报单位天津大学等代表。

与会专家听取了标准申报单位对《抽水蓄能电站进/出水口水力数值计算及模型试验规程》标准编制背景、必要性、目的和意义以及草案主要内容的汇报，并进行了认真讨论。经审查和投票表决，一致同意《抽水蓄能电站进/出水口水力数值计算及模型试验规程》标准立项。

2025年6月20日，中国水力发电工程学会下发了《抽水蓄能电站进/出水口水力数值计算及模型试验规程》标准立项通知书。

4 标准结构和内容说明（研究内容的确定和说明，主要内容的试验、验证及论述情况，主要内容及条款的说明，对各阶段征求意见的处理情况说明）

4.1 研究内容的确定和说明

本规程的主要内容包括前言、引言、规范性引用文件、术语和定义、总体要求、水力学数值模拟和水力学模型试验。

规程的前言部分介绍了起草单位和主要起草人。

规程的引言部分介绍了本规程的编制背景与目的。

规程的规范性引用文件部分介绍了本规程引用的相关标准。

规程的术语和定义部分给出了术语的定义。

规程的总体要求部分，首先给出了开展进/出水口水力学研究所需要的资料、研究内容；其次分别给出了开展进/出水口水力学数值模拟的步骤和开展进/出水口水力学模型试验的步骤；最后给出了侧式进/出水口水力特性应满足的要求和竖井式进/出水口水力特性应满足的要求。

规程的水力学数值模拟部分，按照数值模拟的步骤分别给出了侧式进/出水口和竖井式进/出水口的数值模拟的相应要求。具体包括紊流模拟方法的选取、模拟范围与边界条件的设定、网格划分、计算工况、设计方案数值模拟结果与分析、优化方案数值模拟结果与分析、推荐方案数

值模拟结果与分析、结论与建议，以及撰写研究报告。

规程的水力学模型试验部分，按照模型试验的步骤分别给出了侧式进/出水口和竖井式进/出水口的模型试验的相应要求。具体包括模型相似准则与模型几何缩尺、模拟范围及模型边界、模型制作与安装、试验量测方法、试验工况、设计方案模型试验结果与分析、优化方案模型试验结果与分析、推荐方案模型试验结果与分析、结论与建议，以及撰写研究报告。

规程的附录为资料性附录，给出了模型试验测量结果的表和图的样例。

4.2 初稿评审阶段的修改说明：

2025年7月10日，中国水力发电工程学会《以下简称学会》委托水工水力学专业委员会在北京组织召开了《抽水蓄能电站进/出水口水力数值计算及模型试验规程》初稿评审会。

根据初稿评审意见，对规程初稿进行了修改，具体如下：

(1) 修改了术语与定义的相关表述，包括出流工况、进流工况、进/出水口水头损失、流速分布不均匀系数、流量分配不均匀系数等。

(2) 在总体要求中，明确了数值模拟和模型试验开展的阶段要求。根据专家意见，增加了“对复杂工程应开展模型试验研究，对重大工程建议开展平行研究”内容。复杂工程是指侧式进/出水口连接隧洞平面转弯和立面转弯的情况，进/出水口附近库区地形复杂（例如有大坝、残留围堰、地形不对称、对面有山梗等阻碍水流等）的情况，以及竖井式进/出水口的情况。重大工程是指装机容量大于2000MW，单洞流量大于300m³/s的工程。

(3) 将模型几何缩尺修改为模型几何比尺。

(4) 修改了5.11数值模拟研究报告包括的内容。

(5) 修改了附录部分。原初稿给出了不同类型进出水口模型试验数据用于验证数值模拟方法，会议时有专家觉着没必要，也考虑到没办法给出完整图纸，这次就删除了。本次附录部分给出了模型试验测量结果的表和图的样例，便于试验时参考。

(6) 为体现本规程的先进性，也为了方便分析研究结果，本规程增加了进/出水口水力特性评判标准，在修改稿的5.8设计方案数值模拟结果和分析中，具体包括：

① 5.8.1.1 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，否则进一步优化。支撑材料请见下面的表1。这一条是现行规范没有的。

② 5.8.1.3 侧式进/出水口的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，否则进一步优化。这一条是现行规范规定的。

③ 5.8.1.4 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，否则进

一步优化。这一条是现行规范没有的。现行规范规定相邻孔口流量不均匀程度应小于 10%，且没有定义，该标准也不符合实际，因此本规程规定孔口流量分配不均匀系数，且给出了严格定义。这一条也与即将发布的《抽水蓄能电站进/出水口设计规范》的定义一致。

④5.8.2.1 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。支撑材料请见下面的表 2。这一条是现行规范没有的。

⑤5.8.2.3 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，否则需进一步优化。支撑材料请见下面的表 3，这一条是现行规范没有的。

⑥ 5.8.2.4 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，否则进一步优化。这一条是现行规范没有的。现行规范规定相邻孔口流量不均匀程度应小于 10%，且没有定义，该标准也不符合实际，因此本规程规定孔口流量分配不均匀系数，且给出了严格定义。这一条也与即将发布的《抽水蓄能电站进/出水口设计规范》的定义一致。

(7) 增加了数值模拟进/出水口水头损失及水头损失系数计算公式，详见 5.8.1.1。

(8) 增加了数值模拟闸门井段水头损失及水头损失系数计算公式，详见 5.8.1.2。

(9) 模型几何比尺（原型量与模型量的比值），会议讨论时确定的是宜小于 40，经查阅我们做过的模型试验，当单洞流量较大输水隧洞直径超过 10m 的情况也是有的，若模型比尺 40 则模型管径达到了 25cm 模型建造困难，因此这次改为宜小于 45。

(10) 关于试验观测漩涡的比尺效应，应尽量使模型雷诺数和韦伯数超过一定的临界值，仍然保留。这次提至了 6.1.4，因为这是模型设计时就应该考虑的。

(11) 增加了模型试验进/出水口水头损失及水头损失系数计算公式，详见 6.5.1.5。

(12) 增加了模型试验闸门井段水头损失及水头损失系数计算公式，详见 6.5.1.6。

(13) 关于水头损失量测，会议时专家提出应计算雷诺数、保证进入紊流粗糙区。经查阅资料及分析，进入紊流粗糙区的雷诺数不是一个固定值，很难给出临界值。因此，在 6.1 模型相似准则与模型几何比尺中增加了一条“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”；在 6.5.1 水头损失量测中增加了一条“6.5.1.7”具体量测方法来保证水头损失不随流量变化（与雷诺数无关）达到了紊流粗糙区。

5 相关标准对比说明（和国内标准比较情况、国际标准比较情况）

我国现行的适用于抽水蓄能电站进/出水口设计的规范，目前有《抽水蓄能电站设计规范》

(NB/T10072-2018)和《水电站进水口设计规范》(NB/T 10858-2021),这2个规范是设计人员进行抽水蓄能电站进/出水口设计的依据;明确了进/出水口应满足的水力学指标,是评价进/出水口设计优劣的依据。这2个规范均提出了应对初步设计的进/出水口进行数值模拟或模型试验研究,以获得满足各项水力指标要求的较优的进/出水口设计方案,但没有涉及如何保证和评价数值模拟或模型试验的研究结果是否合理、正确。

鉴于不同过水建筑物的各自特点,不同类型过水建筑物的数值模拟和模型试验等研究方法均制定了相应的规范或规程,以保证数值模拟或模型试验结果的合理性和正确性,目前这方面的规范或规程大约15个。例如,《水电水利工程常规水工模型试验规程》(DL/T 5244-2010)适用于常规泄水建筑物的模型试验研究;《水电站有压输水系统水工模型试验规程》(DL/T 5247-2010)适用于有压输水系统模型试验研究;《水电站调节保证设计导则》(NB/T 10342-2019)适用于水电站水力过渡过程的分析计算;《水电工程泄水建筑物水力学数值模拟技术规程》(DL/T 5856-2022)适用于较大流量的泄水建筑物水力学数值模拟。

因此,目前已有的各类过水建筑物的数值模拟和模型试验等研究方法的规范或规程,没有适合于开展抽水蓄能电站进/出水口水力数值模拟和模型试验研究的相应规范或规程。

6 标准实施措施说明

拟采取以下几方面实施措施:

- (1) 面向研究单位和设计单位,对本规程进行定期讲座,解释本规程的重点和关键点。
- (2) 设计院加强对研究单位提出的进/出水口水力学数值模拟和模型试验研究成果的合理性和准确性进行分析。
- (3) 水电水利规划设计总院在抽水蓄能电站可行性研究阶段审查会期间对进/出水口设计及水力学研究成果进行专项审查。

7 支撑材料及分析

(1) 关于侧式进/出水口水头损失

对于侧式进/出水口,基于同类工程可比性的考虑,其水头损失系数 ξ 等于水头损失除以输水隧洞速度水头 $\frac{\alpha v^2}{2g}$,即 $\xi = h_j / (\frac{\alpha v^2}{2g})$ 。综合表1的15个侧式进/出水口水头损失结果以及笔者研究过的另外40多个侧式进/出水口水头损失结果和其他研究者发表的结果,对于优化后的侧式进/出水口,进流工况的水头损失系宜小于0.30、出流工况的水头损失系宜小于0.40。若水头损失系数大于这些数值,说明进/出水口体型还有优化空间,应进一步优化。

表 1 侧式进/出水口水头损失系数统计

序号	名称	进流工况 ξ_{JL}	出流工况 ξ_{CL}
1	XL	0.24	0.35
2	FN	0.22	0.36
3	ZR	0.21	0.34
4	DH	0.23	0.38
5	HY	0.25	0.39
6	WD	0.25	0.39
7	ZH	0.22	0.33
8	FN	0.23	0.37
9	FE	0.22	0.37
10	YM	0.20	0.39
11	QY	0.25	0.38
12	WH	0.26	0.38
13	XT	0.23	0.36
14	TD	0.24	0.36
15	SZ	0.20	0.38

(2) 关于竖井式进/出水口水头损失

统计表 2 数据表明, 进流工况竖井式进/出水口水头损失系数一般在 0.40~0.53 之间, 出流工况竖井式进/出水口水头损失系数一般在 0.54~0.64 之间。分析所统计的数据, 只用 XL 的水头损失系数最大, 进流工况为 0.53、出流工况为 0.64, 其余的水头损失系数进流工况 0.40~0.50、出流工况 0.54~0.60。作者认为, 因 XL 抽水蓄能电站竖井式进/出水口研究的较早, 当时的优化研究方法远不如现在先进, 其体型还有进一步优化的空间, 其水头损失系数可进一步减小。对于竖井式进/出水口, 经过充分优化后, 进流工况的水头损失系数宜小于 0.50、出流工况的水头损失系数宜小于 0.60。若水头损失系数大于这些值, 说明进/出水口体型还有优化空间, 应进一步优化。

表2 竖井式进/出水口水头损失系数统计

序号	工程名称	进流工况 ξ_{JL}	出流工况 ξ_{CL}
1	XL	0.53	0.64
2	YM	0.40	0.56
3	ZR	0.50	0.58
4	WF	0.42	0.54
5	ZH	0.42	0.57
6	TZ	0.45	0.55
7	GL	0.48	0.57
8	TL	0.47	0.54
9	JX	0.47	0.54

10	ZL	0.44	0.56
11	PX	0.47	0.55

(3) 关于竖井式进/出水口拦污栅断面流速分布

统计表 3 的数据, 出流工况, 拦污栅断面近底板处存在反向流速, 反向流速最大值在-0.21m/s~0.07m/s 之间, 少数如 XL 反向流速-0.44m/s; 反向流速区范围占孔口高度 12.75%~18.50%, 少数如 YM 反向流速区占孔口高度 25.64%; 拦污栅断面流速分布不均匀系数, GL 的为 2.77~2.96 较小, WF 的为 3.61~4.32 较大, 其余的仍大于 3.0, 这是因为以前的研究认为既然有反向流速了就没有必要再计算流速分布不均匀系数了。作者认为, 该少数反向流速区占孔口高度超过 20%的还是有优化空间的, 而且作者最近进行的几个竖井式进/出水口体型优化研究其反向流速区占孔口高度均小于 20%, 同时拦污栅断面流速分布不均匀系数尽量控制在小于 3.0 之内。进流工况, 拦污栅断面流速分布较均匀, 流速不均匀系数在 1.14~1.47 之间。

因此, 竖井式进/出水口, 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, 因目前统计结果多数大于 3.0 因此可以适当放宽; 进流工况, 拦污栅断面流速分布不均匀系数宜小于 1.5, 否则需进一步优化。

表3 竖井式进/出水口拦污栅断面流速分布统计

序号	工程名称	出流工况					进流工况	
		流量 / (m ³ /s)	底部反向流速			流速分布不均匀系数	流量 / (m ³ /s)	流速分布不均匀系数
			最大值 / (m/s)	高度 /m	占比 /%			
1	XL	93.52	-0.44	0.50	14.29	2.93~3.88	108.36	1.28~1.37
2	YM	160.00	-0.20	1.00	25.64	2.74~4.16	183.80	1.14~1.38
3	ZR	133.20	-0.17	0.60	17.60	2.81~3.56	155.60	1.16~1.29
4	WF	181.40	-0.21	0.70	17.50	3.61~4.32	211.60	1.21~1.47
5	ZH	232.20	-0.10	0.65	15.12	2.98~3.32	260.40	1.18~1.24
6	TZ	208.80	-0.07	0.51	12.75	2.24~3.27	242.10	1.29~1.30
7	GL	105.72	-0.12	0.64	18.29	2.77~2.96	119.14	1.26~1.29
8	TL	145.96	-0.14	0.74	18.50	2.14~3.25	160.92	1.27~1.28
9	JX	143.00	-0.08	0.48	13.71	2.41~3.21	169.00	1.34~1.39
10	ZL	250.80	-0.14	0.78	16.60	2.84~3.22	288.60	1.26~1.29
11	PX	120.16	-0.11	0.55	15.71	2.23~3.53	139.60	1.24~1.33